



Otimização Energética de Equipamentos Produtivos no Setor de Misturação

NUNO SANTOS GUEDES

julho de 2017

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Otimização Energética de Equipamentos Produtivos no Setor de Misturação

NUNO SANTOS GUEDES

Junho de 2017

Otimização Energética de Equipamentos Produtivos no Setor de Misturação

| Departamento de Engenharia Química |
| Mestrado Energia e Biorrefinaria |
| Dissertação de Mestrado (DISEST) |

30/6/2017

Nuno Santos Guedes

Orientadoras do ISEP:

Eng^a Paula Neto

Eng^a Anabela Guedes

Orientadores na Continental Mabor:

Eng^o Rafael Manso

Eng^o Rui Nunes

Agradecimentos

Quero agradecer à administração da Continental Mabor, pela oportunidade de realização deste projeto curricular e tornar assim possível o meu primeiro contacto com a indústria. Ao chefe do departamento de engenharia, Eng.^o Rui Nunes, por ter possibilitado a realização da dissertação no departamento de engenharia 1, Misturação.

Ao meu orientador na Continental Mabor, Eng.^o Rafael Manso, pela disponibilização do tempo e ajuda necessários para a elaboração desta dissertação.

A toda a equipa envolvida nos departamentos de engenharia, nas áreas de misturação e energia, por toda a ajuda e cooperação prestados. Em particular à Eng.^a Filipa Trigo, ao Eng.^o Pedro Fumega, Eng.^o Bruno Nunes, José Carlos Gomes, Horácio Costa, Ricardo Silva, Vítor Moreira e Anastácio Nunes, pela paciência e ajuda demonstrada ao longo de todo o estágio, para que todos os objetivos fossem alcançados.

Agradeço às minhas orientadoras do ISEP, Eng.^a Paula Neto e Eng.^a Anabela Guedes, por todo o apoio, ajuda e dedicação demonstrados ao longo do percurso.

Um enorme obrigado aos meus pais e familiares pelo apoio incondicional demonstrado ao longo de todos estes anos. A todos os meus professores, colegas e amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

Por fim, agradeço à minha companheira, Helena Sofia Mourão Vinhas, pelo apoio incondicional, amizade, ajuda em todos os sentidos e pela paciência e compreensão ao longo desta jornada.

Sumário

A Continental Mabor S.A. é uma empresa líder no setor automóvel, e como tal, tem a necessidade de adotar continuamente estratégias de melhoria e otimização para um crescimento rentável e sustentado, com vista à afirmação da sua posição no mercado.

A presente dissertação teve como principal objetivo encontrar soluções de otimização energética, no setor principal do processo de fabrico dos componentes que constituem um pneu, a secção de misturação e respetivos sistemas auxiliares, como é o caso do transporte de uma das matérias-primas, o negro de fumo.

O desenvolvimento deste estudo passou por diversas fases como, a integração na empresa no sentido de conhecer o processo produtivo da Continental Mabor, a análise das utilidades energéticas consumidas no ano de 2016 nos setores em estudo e a identificação de oportunidades de redução de consumos sem prejuízo do rendimento produtivo.

Nesta dissertação foram sugeridas/estudadas 4 medidas de otimização, tendo sido possível implementar e testar parte delas. Como primeira medida foi elaborado um novo plano de controlo para os compressores utilizados na produção de ar comprimido responsável pelo transporte de negro de fumo, tendo sido possível realizar a sua implementação e teste. Com esta medida foi possível reduzir o consumo específico médio do conjunto dos compressores de 0,204 kWh/m³ (PTN) para 0,136 kWh/m³ (PTN), traduzindo-se numa poupança anual na ordem dos 23 000 €. Para além da poupança em termos energéticos/económicos, esta medida previne o acionamento de compressores sem que haja essa necessidade, diminuindo assim a manutenção requerida pelos mesmos.

Como segunda medida, foi estudada a viabilidade energética/económica na substituição do tipo de válvulas utilizadas nos mecanismos de limpeza dos filtros de mangas dos silos de armazenamento de negro de fumo, e nos coletores de aspiração acoplados aos misturadores. Concluiu-se que, no caso dos silos, um investimento inicial de 38 250 € levaria a uma poupança anual entre 5 876 €/ano e 9 893 €/ano, traduzindo-se num período de retorno do investimento entre 6,5 e 3,9 anos, consoante o aumento do intervalo de tempo entre disparos de limpeza. Após testes realizados, o intervalo de tempo entre disparo que foi possível alcançar sem causar problemas no transporte foi de 15 segundos. Verificou-se também que das poupanças estimadas, aproximadamente 5 200 €/ano correspondem a fugas existentes nestas válvulas, o que com a simples

reparação das mesmas o problema seria resolvido. Para o estudo relativo à substituição das válvulas nos coletores de aspiração concluiu-se que para um investimento de 89100 €, a poupança anual estimada varia entre 18 139 €/ano e 121 683 €/ano, traduzindo-se num período de retorno do investimento entre 4,9 e 0,7 anos, consoante o aumento do intervalo de tempo entre disparo de limpeza que será possível alcançar após a sua implementação (4;10;15;30 e 60 segundos).

Outra medida de otimização sugerida, consistiu na substituição das bombas pneumáticas de duplo diafragma utilizadas nos tanques de banho antiaderente, por bombas elétricas de cavidade progressiva (parafuso). Após análise e testes realizados, concluiu-se que com a sua substituição, a poupança anual resultante será de 18 663 €. O investimento total necessário é de 18 504 e 11 904€, para as bombas com e sem variador de frequência, traduzindo-se num período de retorno do investimento de 11,9 e 7,7 meses respetivamente.

Por fim, foi sugerida a implementação de um sistema de padronização e alerta dos consumos energéticos dos diversos equipamentos existentes na empresa. Uma vez que existe um software de monitorização desses consumos, MESSDAS, a implementação deste tipo de sistema poderá auxiliar na deteção antecipada de possíveis problemas e avarias nas respetivas máquinas. Desta forma o tempo de resposta das equipas de manutenção curativa e preventiva melhoram, impedindo assim problemas de maior dimensão e ao mesmo tempo reduzindo os custos associados a estas.

Palavras - chave: Otimização energética; Ar comprimido; Energia elétrica; Transporte pneumático; Bomba cavidade progressiva.

Abstract

Continental Mabor S.A. is a leader in the automotive industry, and as such, has a need to continually adopt improvement and optimization strategies for profitable and sustained growth, in order to affirm its position in the market.

The main objective of this dissertation was to find energy optimization solutions, in the main sector of the manufacturing process of components that constitute a tire, the mixing section and its auxiliary systems, such as the transport of one of the raw materials, the carbon black.

The development of this study has undergone several phases, such as the integration in the company to learn about the production process of Continental Mabor, the analysis of the energy utilities consumed in the year 2016 in the sectors under study and the identification of opportunities to reduce consumption without prejudice the productive income.

In this dissertation 4 optimization measures were suggested / studied, and it was possible to implement and test some of them. As a first step a new control plan was developed for the compressors used in the production of compressed air responsible for the transport of carbon black, and it was possible to carry out its implementation and testing. With this measure it was possible to reduce the average specific consumption of the compressors as a whole from 0,204 kWh / m³ (PTN) to 0,136 kWh / m³ (PTN), resulting in annual savings of around 23 000 €. In addition to saving in terms of energy / economics, this measure prevents the operation of compressors without this need, thus reducing the maintenance required by them.

As a second measure, the energetic / economic feasibility was studied in the substitution of the type of valves used in the cleaning mechanisms of the filters sleeves of the silos of carbon black storage, and in the aspiration collectors coupled to the mixers. It was concluded that, in the case of silos, an initial investment of 38 250 € would lead to annual savings of 5 876 €/year and 9 893 €/year, translating into a return period of investment between 6,5 and 3,9 years, depending on the increase in the time interval between cleaning shots. After testing, the time interval between shots that could be achieved without causing transportation problems was 15 seconds. It was also verified that of the estimated savings, approximately 5 200 €/year corresponded to leaks existing in these valves, which with the simple repair of them the problem would be solved. For the study on the replacement of the valves in the aspiration collectors, it was concluded

that for an investment of 89 100 €, the estimated annual savings vary between 18 139 €/year and 121 683 €/year, translating into a return period of investment between 4,9 and 0,7 years, depending on the increase in the time interval between the cleaning shots that can be reached after its implementation (4; 10; 15; 30 and 60 seconds).

Another suggested optimization measure was the replacement of double diaphragm pneumatic pumps used in bath tanks with progressive cavity electric pumps. After analysis, it was concluded that with its replacement, the resulting annual savings will be 18 663 €. The total investment required is 18 504 and 11 904 €, for pumps with and without frequency inverter, translating into a return period of investment of 11,9 and 7,7 months respectively.

Finally, it was suggested the implementation of a system of standardization and alert of the energy consumptions of the diverse equipment existing in the company. Since there is a monitoring software for these consumptions, MESSDAS, the implementation of this type of system can help in the early detection of possible problems and malfunctions in the respective machines. This way, the response time of curative and preventive maintenance teams improves, that will prevent bigger problems and at the same time reduce the costs associated with them.

Key-Words: Energy optimization; Compressed Air; Electrical Energy; Pneumatic Conveying; Progressive cavity pump.

Índice

1.	Introdução	1
1.1	Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A.	1
1.2	Enquadramento da dissertação	2
1.2.1	Consumo energético mundial e nacional	2
1.2.2	Desenvolvimento sustentável e gestão de energia	4
1.3	Objetivos da dissertação	5
1.4	Estrutura da dissertação	5
2	O pneu e o processo de fabrico	7
2.1	O pneu	7
2.2	Processo de fabrico do pneu	9
3	Processo de misturação e sistemas de transporte de matérias-primas	13
3.1	Etapas do processo de misturação	13
3.1.1	Misturação Master	14
3.1.2	Misturação Final	22
3.2	Sistema de transporte e armazenamento de negro de fumo	24
3.2.1	Sistema de armazenamento de negro de fumo	24
3.2.2	Sistema de transporte de negro de fumo	26
3.2.3	Sistema de produção e tratamento de ar comprimido	29
4	Levantamentos Energéticos	33
4.1	Produção e consumo total da Continental Mabor	33
4.2	Consumos energéticos dos misturadores	37
4.3	Consumos energéticos do sistema de transporte de negro de fumo	41
5	Medidas de otimização	45
5.1	Estudo e otimização da central de negro de fumo	45
5.1.1	Fugas da central de negro de fumo	45

5.1.2	Criação e implementação de um novo plano de controlo.....	48
5.2	Estudo da viabilidade energética/económica da substituição das válvulas de sopro usadas nos mecanismos de limpeza dos filtros de mangas.....	53
5.2.1	Substituição das válvulas de limpeza nos silos diários de negro de fumo.....	56
5.2.2	Substituição das válvulas de limpeza nos coletores de aspiração dos misturadores.....	59
5.3	Substituição das bombas de recirculação dos tanques de banho antiaderentes dos misturadores	62
5.4	Padronização dos consumos energéticos dos diversos equipamentos..	67
6	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	69
	Bibliografia	71
	Anexos	73
A.	Levantamentos Energéticos	73
B.	Medidas otimização	82
B.1	Otimização da central de negro de fumo	82
B.2	Estudo da viabilidade energética/económica na substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas	96
B.3	Substituição das bombas de recirculação dos tanques de banho antiaderentes dos misturadores.....	107

Índice de Figuras

Figura 1.1 Vista aérea das instalações da Continental Mabor (Cofely, s.d.).....	1
Figura 1.2 Representativo do consumo anual de energia no mundo e em Portugal (Enerdata, 2016).....	3
Figura 1.3 Ideais que englobam o desenvolvimento sustentável (Adaptado de (Desenvolvimento Sustentável, 2017)).	4
Figura 2.1 Representação das camadas que constituem um pneu (Adaptado de (Continental AG., 2008)).	7
Figura 2.2 Composição média de um pneu para um veículo ligeiro de passageiros (Adaptado de (Continental AG., 2008)).....	9
Figura 2.3 Diagrama das etapas do processo de fabrico do pneu	9
Figura 3.1 Diagrama das etapas do processo de misturação.....	13
Figura 3.2 Esquema das etapas e componentes do misturador master	15
Figura 3.3 Representação dos diferentes componentes do corpo do misturador (HF Mixing Group, 2017).	15
Figura 3.4 Esquema representativo de uma TCU.	16
Figura 3.5 Coletor de aspiração acoplado à camara de mistura do misturador.....	17
Figura 3.6 Configuração da extrusora (1) e calandra (2) na máquina de misturação master (HF Mixing Group, 2017; RubberMW, 2015).	18
Figura 3.7 Configuração dos rolos da calandra na máquina de misturação master (HF Mixing Group, 2017).	19
Figura 3.8 Configuração dos rolos do moinho de homogeneização na máquina de misturação master (HF Mixing Group, 2017).	19
Figura 3.9 Configuração do tanque de banho antiaderente (1) e batch-off (2) (Reshine, 2013).	20
Figura 3.10 Demonstração do percurso do composto desde o banho antiaderente (1) até ao seu empilhamento final (3).	20
Figura 3.11 Posicionamento de um composto master/final numa mesa de empilhamento.	21

Figura 3.12 Representação do posicionamento dos diferentes componentes de um misturador (Adaptado de (Warrier, 2015)).....	22
Figura 3.13 Esquema das etapas e componentes do misturador final	23
Figura 3.14 Esquema do sistema de transporte e armazenamento exterior.....	25
Figura 3.15 Esquema do sistema de transporte e armazenamento interior de um misturador.....	25
Figura 3.16 Mecanismo de admissão de negro de fumo na tubagem de transporte. ..	26
Figura 3.17 Tubagem de transporte de negro de fumo e mecanismo bypass.	27
Figura 3.18 Mecanismo de doseamento de negro de fumo e pesagem nos silos diários.	28
Figura 3.19 Representação do sistema de filtração de negro de fumo nos silos mensais e diários, e respetivo mecanismo de limpeza (Mills, 2004).	28
Figura 3.20 Representação da central de negro de fumo.	30
Figura 3.21 Representação dos componentes do sistema de controlo do transporte de negro de fumo.....	31
Figura 4.1 Representação da produção mensal de pneus obtida pela Continental Mabor no ano de 2016.....	33
Figura 4.2 Representação do consumo mensal de energia obtida pela Continental Mabor no ano de 2016.....	34
Figura 4.3 Representação dos consumos específicos mensais da Continental Mabor, no ano de 2016.....	35
Figura 4.4 Consumos energéticos, expressos em toneladas equivalentes de petróleo, para as diferentes utilidades consumidas pela Continental Mabor no ano de 2016.	36
Figura 4.5 Representação dos custos associados às utilidades consumidas pela Continental Mabor no ano de 2016.	37
Figura 4.6 Representação dos consumos de energia elétrica dos misturadores, no ano de 2016.....	38
Figura 4.7 Representação da produção/processamento de compostos alcançada dos misturadores, no ano de 2016.	39
Figura 4.8 Representação do consumo específico dos misturadores, no ano de 2016.	39

Figura 4.9 Representação do peso médio (%) de cada componente, no consumo de energia total dos misturadores master.	40
Figura 4.10 Representação do peso médio (%) de cada componente, no consumo de energia total dos misturadores finais.....	40
Figura 4.11 Representação da produção anual de ar comprimido, relativa aos compressores da central de negro de fumo.	41
Figura 4.12 Representação do consumo energético anual, relativo aos compressores da central de negro de fumo.	42
Figura 4.13 Representação do consumo específico anual, relativo aos compressores da central de negro de fumo.	42
Figura 5.1 Dados recolhidos dos ensaios realizados para a quantificação das fugas de ar comprimido na central de negro de fumo.	46
Figura 5.2 Representação das válvulas solenoides com diafragma utilizadas no mecanismo de limpeza dos filtros de mangas.....	54
Figura 5.3 Visualização das válvulas solenoides instaladas nos silos de negro de fumo (imagem do lado esquerdo) e nos coletores de aspiração (imagem do lado direito). ..	54
Figura 5.4 Mecanismo de funcionamento das novas válvulas “MAC Pulse Valve” (MAC, 2017).	55
Figura 5.5 Visualização das válvulas MAC instaladas nos silos de negro de fumo.	55
Figura 5.6 Representação de uma bomba de diafragma duplo (A) e respetivo mecanismo de funcionamento (B) (Adaptado de (Versa-Matic, 2017)).	62
Figura 5.7 Representação de uma bomba peristáltica (A) e respetivo mecanismo de funcionamento (B) (Adaptado de (PCM, 2017)).	63
Figura 5.8 Representação de uma bomba de cavidade progressiva (A) e respetivo mecanismo de funcionamento (B) (Adaptado de (PCM, 2017)).	64
Figura 5.9 Visualização da bomba elétrica de teste da marca PCM.....	65
Figura B.1 Curva característica da bomba de diafragma utilizada nos tanques de banho (Adaptado de (Versa-Matic, 2017)).	108
Figura B.2 Especificações técnicas fornecidas pelo fornecedor da bomba PCM 2M6F dimensionada.	109

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 Características dos compressores da central de negro de fumo.	29
Tabela 4.1 Parâmetros de controlo utilizados nos compressores da central de negro de fumo.	44
Tabela 5.1 Resultados obtidos para a determinação das fugas de ar comprimido existentes na central de negro de fumo, através do método da capacidade do compressor.	46
Tabela 5.2 Quadro resumo da redução do caudal de fugas na central de negro de fumo.	47
Tabela 5.3 Dados obtidos para os parâmetros de controlo dos compressores da central de negro de fumo.	49
Tabela 5.4 Resumo dos parâmetros de controlo obtidos para os diferentes compressores da central de negro de fumo.	50
Tabela 5.5 Resumo dos parâmetros de controlo implementados para os diferentes compressores da central de negro de fumo.	51
Tabela 5.6 Resumo dos resultados obtidos através da implementação dos novos parâmetros de controlo nos compressores da central de negro de fumo.	52
Tabela 5.7 Resultados obtidos relativo aos ensaios realizados às válvulas de limpeza de 1" dos filtros de mangas.	56
Tabela 5.8 Resultados obtidos dos ensaios realizados para as fugas das válvulas de limpeza de 1" dos filtros de mangas.	57
Tabela 5.9 Resultados obtidos relativamente à análise realizada para a substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas presentes nos silos diários.	58
Tabela 5.10 Resultados obtidos relativo às válvulas de limpeza dos filtros de mangas de 1"1/2.	60
Tabela 5.11 Resultados obtidos relativamente à análise realizada para a substituição das válvulas de limpeza num coletor de aspiração.	61
Tabela 5.12 Resumo dos dados obtidos para a substituição da bomba de diafragma duplo pela bomba de cavidade progressiva.	66
Tabela 5.13 Análise económica da substituição das bombas dos tanques de banho .	66
Tabela A.1 Valores de produção e consumos energéticos por mês, no ano de 2016. 73	

Tabela A.2 Valores dos consumos energéticos por mês, expressos em toneladas equivalentes de petróleo, no ano de 2016.	74
Tabela A.3 Valores dos custos das utilidades por mês, no ano de 2016.....	76
Tabela A.4 Valores de produção e consumos energéticos recolhidos para os misturadores, referente ao ano de 2016.	78
Tabela A.5 Valores de produção de ar comprimido recolhidos para os compressores da central de negro de fumo, referente ao ano de 2016.....	79
Tabela A.6 Valores de consumo energético recolhidos para os compressores da central de negro de fumo, referente ao ano de 2016.	80
Tabela A.7 Valores Anuais para os compressores da central de negro de fumo e respetivo consumo específico, referente ao ano de 2016.	81
Tabela B.1 Dados recolhidos para os dois ensaios realizados na determinação das fugas de ar comprimido da central de negro de fumo.	82
Tabela B.2 Dados recolhidos para os dois ensaios realizados na determinação das fugas de ar comprimido da central de negro de fumo (Continuação).....	83
Tabela B.3 Características da tubagem e reservatório da central de negro de fumo...	85
Tabela B.4 Resumo dos dados obtidos para o novo plano de controlo dos compressores da central de negro de fumo.	87
Tabela B.5 Dados recolhidos após implementação do plano de controlo elaborado para a central de negro de fumo.	95
Tabela B.6 Dados experimentais recolhidos relativamente aos consumos de ar comprimido das válvulas do mecanismo de limpeza dos filtros de mangas.	96
Tabela B.7 Dados experimentais recolhidos relativamente aos consumos de ar comprimido das válvulas do mecanismo de limpeza dos filtros de mangas (Continuação).	97
Tabela B.8 Dados experimentais recolhidos relativamente às fugas de ar comprimido das válvulas do mecanismo de limpeza dos filtros de mangas.	98
Tabela B.9 Resultados intermédios obtidos para as estimativas realizadas relativamente ao funcionamento das válvulas MAC 1" a instalar nos silos de negro de fumo.	99
Tabela B.10 Resultados obtidos para a substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas nos silos diários de negro de fumo.	101

Tabela B.11 Dados recolhidos relativos à relação existente entre a quantidade de ar comprimido consumido por disparo de limpeza das válvulas de 1", em relação a válvulas de outras dimensões.....	103
Tabela B.12 Resultados intermédios obtidos para as estimativas realizadas relativamente ao funcionamento das válvulas MAC 1"1/2 a instalar nos coletores de aspiração dos misturadores.....	105
Tabela B.13 Resultados obtidos para a substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas nos coletores de aspiração dos misturadores.....	106
Tabela B.14 Dados experimentais recolhidos relativamente aos consumos de ar comprimido das bombas de diafragma duplo utilizadas nos tanques de banho dos misturadores.....	108
Tabela B.15 Cotações obtidas para a aquisição da bomba PCM 2M6F com e sem variador de frequência.	109
Tabela B.16 Custos associados à manutenção das bombas de diafragma.....	111
Tabela B.17 Custos estimados relativamente à manutenção das bombas PCM 2M6F.	112

Nomenclatura

Variável	Descrição	Unidades
D	Diâmetro da Tubagem	m
h	Entalpia Específica	kJ/kg
H	Entalpia Absoluta	kJ
L	Comprimento da Tubagem	m
M	Massa	kg ou Ton
M_M	Massa Molecular	kg/kmol
P	Pressão	atm ou bar
Pot	Potência	kW
Q	Caudal Volumétrico	m ³ /h
R	Constante dos Gases Perfeitos	dm ³ .atm/(mol.K)
t	Tempo	s
T	Temperatura	K
V	Volume	m ³
ρ	Massa Volúmica	Kg/m ³
η	Rendimento	-
ΔH	Variação de Entalpia	kJ/kg
ΔP	Variação de Pressão	atm ou bar

1. Introdução

No presente capítulo é realizada uma breve apresentação do grupo Continental AG e da empresa na qual foi realizada esta dissertação de mestrado, a Continental Mabor- Indústria de pneus S.A.

No seguimento da apresentação da empresa, é então realizado um enquadramento global do âmbito desta dissertação, referindo os objetivos da mesma, sendo por fim apresentada a estrutura da dissertação.

1.1 Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A.

A empresa Continental Mabor pertence ao grupo Continental e encontra-se localizada em Lousado, no concelho de Vila Nova de Famalicão (Figura 1.1), tendo sido fundada em dezembro de 1989 através da união de duas empresas de renome na indústria das borrachas, a Mabor-Manufatura Nacional de Borracha S.A e a Continental AG (Continental Mabor, 2016).



Figura 1.1 Vista aérea das instalações da Continental Mabor (Cofely, s.d.).

O grupo Continental enquadra-se no setor automóvel, sendo especialista na produção de sistemas de travagem, controlos dinâmicos para viaturas, tecnologias de transmissão de potência, sistemas eletrónicos e sensores. Em termos de organização, a Continental encontra-se dividida em dois grandes grupos, "Sistemas Automotivos" e "Componentes de Borracha", e consiste em cinco divisões (Continental Pneus, 2017):

- Chassis e Segurança, onde se concentram tecnologias modernas para a segurança ativa e passiva e de dinâmica do veículo;

- “Powertrain”, que representa soluções de sistemas inovadores e eficientes para o powertrain do presente e do futuro, para os veículos de todas as categorias;
- Interiores, onde se combinam todas as atividades relacionadas com a apresentação e gestão de informações do veículo;
- Pneus para viaturas de passageiros, pesados e comerciais ligeiros, grupo no qual a Continental Mabor se insere;
- ContiTech, que desenvolve e produz peças funcionais, componentes e sistemas para a indústria automóvel e para outras indústrias.

Em julho de 1990, iniciou-se o grande programa de reestruturação que transformou as instalações antigas da Mabor nas mais modernas, comparativamente às restantes unidades industriais de produção de pneus do grupo Continental AG. Desde a reestruturação, a produção média da empresa em 1996 passou de 5 000 para 21 000 pneus/dia, tendo atualmente atingido um valor superior a 60 000 pneus/dia, apresentando-se assim como uma das fabricas da Continental com melhores índices de produtividade (Continental Mabor, 2016).

A política da Continental Mabor passa pela ambição de ser **LIDER** na divisão de pneus da Continental, tendo como missão conseguir a confiança dos clientes nos serviços e produtos de tecnologia avançada, ser reconhecido pela eficiência, qualidade, flexibilidade, inovação e paixão por vencer e por último, promover a excelência de colaboradores qualificados, motivados e com liberdade para agir. A ambição de ser **LIDER** passa por (Continental Mabor, 2016),

Lousado eficiente;

Inova e antecipa as necessidades dos clientes;

Desenvolve produtos de alta tecnologia;

Excelente no conhecimento e nos processos;

Rentável de forma sustentada.

1.2 Enquadramento da dissertação

1.2.1 Consumo energético mundial e nacional

O constante crescimento da população mundial tem originado a necessidade em produzir e assegurar bens para suprimir todas as necessidades existentes. Nesse contexto, os setores

que exigem essa demanda, onde se enquadra o setor doméstico, de serviços, industrial e dos transportes, têm vindo a expandir e a crescer, o que consequentemente tem levado ao aumento do consumo energético global. Na Figura 1.2 pode ser analisada a variação no consumo de energia total no decorrer dos anos, no panorama mundial e nacional (Enerdata, 2016).

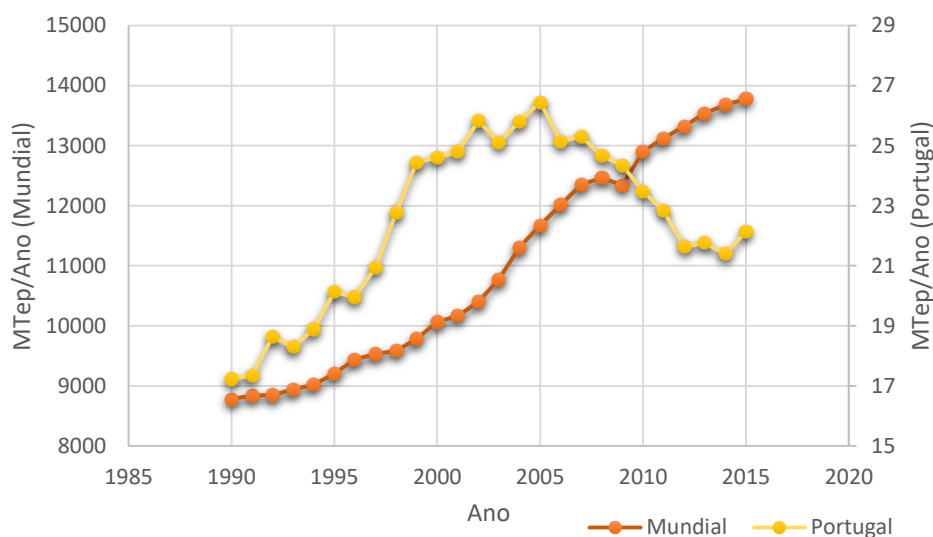


Figura 1.2 Representativo do consumo anual de energia no mundo e em Portugal (Enerdata, 2016).

Através da análise da Figura 1.2 verifica-se que no panorama mundial tem ocorrido um crescimento gradual do consumo energético, devido ao aumento da população mundial. Porém nos últimos anos (2007-2015) esse crescimento tem sido menos acentuado, muito devido à recessão económica sentida, mas também devido à implementação de novas práticas de otimização energética e desenvolvimento sustentável. No panorama nacional verifica-se uma diminuição gradual do consumo de energia desde o ano de 2005, pelas mesmas razões referidas anteriormente, o que realça a extrema importância em diminuir os consumos energéticos, adotando medidas de racionalização desses consumos, levando a um crescimento mais sustentável, e sem risco de rutura (Enerdata, 2016).

Devido a esta necessidade em reduzir os consumos energéticos e ao mesmo tempo a poluição ambiental, as indústrias e outras organizações têm vindo a apostar numa maior eficiência no que toca à produção e consumo de energia. Todavia, esta diminuição do consumo energético tem de ser alcançada, levando em conta outros fatores, como é o caso do aproveitamento económico e o avanço em termos tecnológicos. Nesse sentido, é necessário encontrar um equilíbrio entre estes fatores, beneficiando todas as partes

envolvidas. Uma gestão energética eficiente e bem pensada, levará a uma redução do consumo de energia e dos custos associados, assim como a uma redução da emissão de poluentes, sem que se comprometa a qualidade do produto final desejado (RNAE, 2017).

1.2.2 Desenvolvimento sustentável e gestão de energia

Englobando todos os fatores de uma gestão racional de energia, tem-se o desenvolvimento sustentável, que ocupa um especial protagonismo na agenda energética mundial, englobando a conjugação de três ideais, o desenvolvimento económico, social e ambiental, como demonstrado na Figura 1.3 (APA, 2017; Desenvolvimento Sustentável, 2017)



Figura 1.3 Ideais que englobam o desenvolvimento sustentável (Adaptado de (Desenvolvimento Sustentável, 2017)).

Este tem como objetivo primordial fomentar o crescimento atual sem comprometer a economia das futuras gerações. A racionalização dos consumos energéticos e a redução das emissões de gases com efeitos de estufa são dois pontos fundamentais nesse crescimento, sendo que esta gestão de energia por parte das empresas, acaba por ser um dos impulsores de sucesso que contribui para aumentar as suas vantagens competitivas. O consumo de energia eficiente origina uma redução dos custos de produção associados, contribuindo assim para melhores resultados financeiros, o que permite uma boa capacidade de afirmação no mercado, sendo ao mesmo tempo “amigo” do ambiente (APA, 2017; RNAE, 2017).

Numa empresa, a evolução e crescimento segue uma determinada orientação, não sendo este sempre constante. Como tal, as medidas de gestão energética adotadas devem ser capazes de se moldar, e conseguir acompanhar essas orientações. Nesse sentido, é

imprescindível que todos os elementos da instituição estejam sensibilizados quanto aos benefícios de uma política de gestão energética, para que seja possível a concretização das medidas estabelecidas. Medidas aparentemente insignificantes podem resultar em poupanças expressivas e estimulantes a médio e longo prazo (RNAE, 2017).

1.3 Objetivos da dissertação

A presente dissertação teve como objetivo numa 1ª fase, o levantamento energético dos consumos dos equipamentos produtivos no setor de misturação e posteriormente, numa 2ª fase, avaliar a possibilidade da implementação de medidas de otimização energética. As máquinas usadas no módulo de misturação da Continental Mabor, como também o sistema de transporte de uma das matérias-primas essenciais ao processo de fabrico, o negro de fumo, são alvo dessa otimização energética.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. No capítulo 1 é realizada uma apresentação da empresa e o respetivo enquadramento do tema abordado – otimização energética, sendo por fim mencionados os objetivos específicos da dissertação.

No capítulo 2 é realizada a descrição sucinta do processo produtivo da Continental Mabor S.A., acompanhada da explicação e enumeração dos componentes que constituem o seu produto final, o pneu.

No capítulo 3 inicia-se o desenvolvimento prático do presente estudo, onde é feita uma descrição detalhada das etapas do processo em estudo, da secção da misturação e sistema de transporte de matérias-primas. No capítulo 4 é realizado o levantamento energético global dos consumos da Continental Mabor S.A., sendo realizado o levantamento mais detalhado das secções em estudo.

No capítulo 5 são apresentadas as medidas de otimização estudadas, como também a viabilidade energética e económica das mesmas.

Por fim, no capítulo 6 são descritas as principais conclusões obtidas nesta dissertação, como também a apresentação de sugestões para trabalhos futuros.

2 O pneu e o processo de fabrico

No presente capítulo são abordados conteúdos genéricos do tema no qual esta dissertação se insere, como é o caso do produto que é fabricado, o pneu, e o seu processo de fabrico.

2.1 O pneu

O pneu é um componente essencial para a grande maioria dos meios de transporte terrestres. Este desempenha funções essenciais na estrutura e suporte desses meios, como suportar a carga a que se encontra sujeito, garantir a estabilidade do veículo, proporcionar respostas eficazes nas travagens e acelerações, entre outras, tendo de proporcionar aos seus utilizadores a maior segurança possível. Todas estas funções terão de ser garantidas com um processo de fabrico rigoroso desde as matérias primas utilizadas até ao produto final obtido, assegurando a sua qualidade. Apesar de um pneu aparentar ter uma estrutura simples, da sua composição fazem partes diferentes camadas, cada uma com as suas funções e características. Na Figura 2.1 podem ser visualizadas todas as camadas que compõem um pneu (Continental AG., 2008).

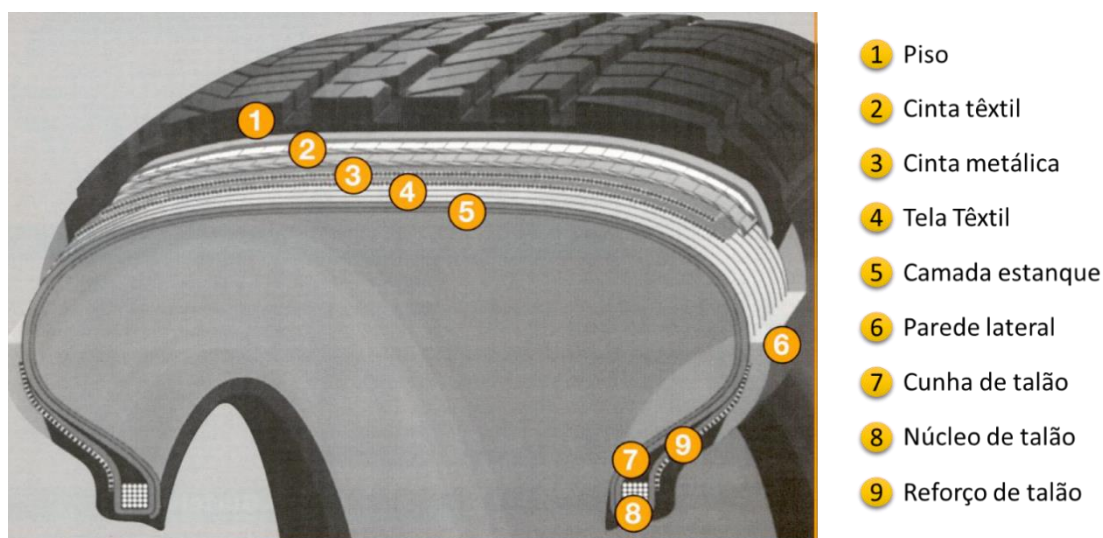


Figura 2.1 Representação das camadas que constituem um pneu (Adaptado de (Continental AG., 2008)).

Seguidamente é feita uma descrição sucinta de todas as camadas que constituem um pneu e suas funcionalidades. A camada externa do pneu, designada por piso, é constituída por borracha natural e sintética, e irá ficar em contacto com o solo. Esta é composta por três camadas, a capa, a base e o ombro. A capa é a camada externa do piso, que será responsável pela aderência à estrada, resistência ao desgaste e à estabilidade direcional. A base é a camada interna do piso, que irá proporcionar a adesão à cinta têxtil ou metálica. E por fim o ombro, que faz a transição entre o piso e a parede lateral do pneu.

A cinta têxtil consiste numa cinta de nylon calandrada, que servirá de barreira térmica entre o piso e as cintas metálicas, como também de reforço ao piso. No caso da cinta metálica, esta é constituída por cordas de aço calandradas que irão garantir a forma e estabilidade direcional, aumentando a durabilidade do pneu.

Após estas camadas, tem-se a tela têxtil e a camada estanque. A tela têxtil é constituída por poliéster ou rayon calandrado, que terá como função fornecer consistência ao pneu, oferecendo resistência às elevadas pressões internas a que este se encontra sujeito. Relativamente à camada estanque, esta é composta por borracha butílica, e irá reter o ar no interior do pneu, funcionando como uma camara de ar.

Passando à parte lateral do pneu temos a parede lateral e o talão. A parede lateral é constituída por borracha natural, tendo como função proteger a carcaça do pneu contra choques laterais e da degradação atmosférica. Relativamente ao talão, este é dividido em três camadas, o núcleo do talão, a cunha do talão e o reforço do talão. O núcleo do talão consiste num aro metálico constituído por arames de aço cobreado, cobertos por borracha, que asseguram que o talão encaixe com firmeza na jante. A cunha de talão é constituída por borracha sintética, e tem como função assegurar uma maior robustez ao talão. Por fim, o reforço de talão consiste numa cinta de nylon que é adicionada ao talão, funcionando como reforço, o que garante uma maior estabilidade direcional, precisão na condução e melhora o conforto (Continental AG., 2008).

Devido a todas as camadas que fazem parte de um pneu, a sua composição irá variar consoante a sua finalidade, mas as matérias-primas usadas no seu fabrico enquadram-se sempre dentro dos mesmos grupos de componentes. Na Figura 2.2 encontra-se representada a composição média de cada matéria-prima utilizada para um pneu de um veículo ligeiro de passageiros (Continental AG., 2008).

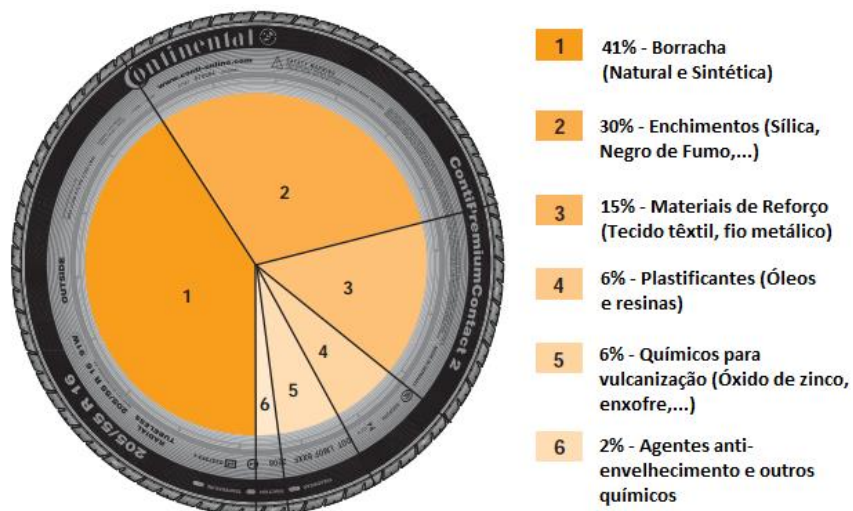


Figura 2.2 Composição média de um pneu para um veículo ligeiro de passageiros (Adaptado de (Continental AG., 2008))

2.2 Processo de fabrico do pneu

O processo de fabrico de um pneu, desde as matérias-primas até ao produto final, compreende várias etapas, cada uma com as suas especificações e características. Este processo pode ser dividido em seis grupos principais, como representado na Figura 2.3, a misturação, a preparação (extrusão, calandragem e corte), a construção, a pintura/lubrificação, a vulcanização e a inspeção final.



Figura 2.3 Diagrama das etapas do processo de fabrico do pneu

Através da análise da Figura 2.3, torna-se necessário conhecer as funções e objetivos de cada etapa do processo, sendo de seguida realizada uma descrição sucinta destas, de forma a ter uma noção genérica do processo de fabrico.

Misturação

Numa primeira fase do processo de fabrico é necessário se proceder à seleção e pesagem das matérias-primas necessárias para a mistura e produção dos compostos de borracha, que serão utilizados nas etapas seguintes do processo. Todas as matérias-primas e compostos produzidos são sujeitos a um controlo de qualidade, assegurando o bom funcionamento de todo o processo de fabrico.

Extrusão

Na etapa de extrusão, os compostos provenientes da mistura são introduzidos numa extrusora, que consiste num parafuso sem fim que pressiona os compostos através de uma abertura, originando um perfil. Desta etapa resultam perfis de borracha, paredes laterais e pisos.

Calandragem

A etapa de calandragem encontra-se dividida em dois tipos, consoante o material a tratar. A calandragem de tecido, que realiza a impregnação ou revestimento de um tecido (têxtil ou metálico) com borracha, e a calandragem de borracha em que se parte de um composto de borracha proveniente da etapa de mistura, que é calandrado com o objetivo de obter camadas de borracha com determinadas dimensões (largura e espessura).

Corte

Numa fase seguinte é realizado o corte dos tecidos têxteis e metálicos provenientes da calandragem. Com o corte dos tecidos têxteis são obtidas as telas têxteis, as cintas têxteis e o reforço de talão. No corte do tecido metálico são obtidas as cintas metálicas.

Construção

Depois de obtidos todos os componentes necessários à montagem do pneu, estes dão entrada no módulo de construção, em que são montadas todas as camadas que constituem o pneu, dando origem ao chamado “pneu em cru” ou “pneu em verde”.

Pintura/Lubrificação

Nesta etapa, dependendo das especificações do produto final, os “pneus em cru” provenientes da construção são lubrificados interiormente e exteriormente com um soluto especial de forma a facilitar a etapa seguinte de vulcanização, evitando a aderência da borracha aos componentes usados na vulcanização.

Vulcanização

O processo de vulcanização consiste em alterar as propriedades da borracha por ação da pressão e temperatura num determinado período de tempo, sendo usado para tal, moldes que facilitam esta etapa, e que irão dar a forma e os relevos finais especificados para o pneu. Nesta etapa, a borracha que constitui o pneu passa de um estado plástico para elástico, não sendo possível a partir deste ponto reintroduzir o pneu novamente no processo de fabrico, caso este não tenha as especificações pretendidas.

Inspeção Final

Por último, é necessário avaliar e verificar se o pneu fabricado se encontra dentro dos parâmetros de qualidade, construção e segurança estabelecidos, sendo realizada verificações manuais/visuais e inspeções automáticas para se averiguar se todos os requisitos são cumpridos. Após esta avaliação, e caso o pneu possua todos os requerimentos necessários, então encontra-se finalizado o processo de fabrico, podendo este ser armazenado para futuro transporte e comercialização.

3 Processo de misturação e sistemas de transporte de matérias-primas

No presente capítulo são abordados conteúdos concretos do tema no qual esta dissertação se insere, sendo explicado o processo de misturação das matérias-primas e os equipamentos que tornam a etapa possível, como também o sistema de transporte de uma dessas matérias-primas, o negro de fumo, indo de encontro aos objetivos da dissertação.

3.1 Etapas do processo de misturação

Como referido anteriormente, tornou-se necessário estudar ao detalhe todas as etapas do processo de misturação, de forma a ser possível identificar todas as possibilidades de melhoria. Na Figura 3.1 encontra-se um esquema simplista das etapas que constituem o processo de misturação.

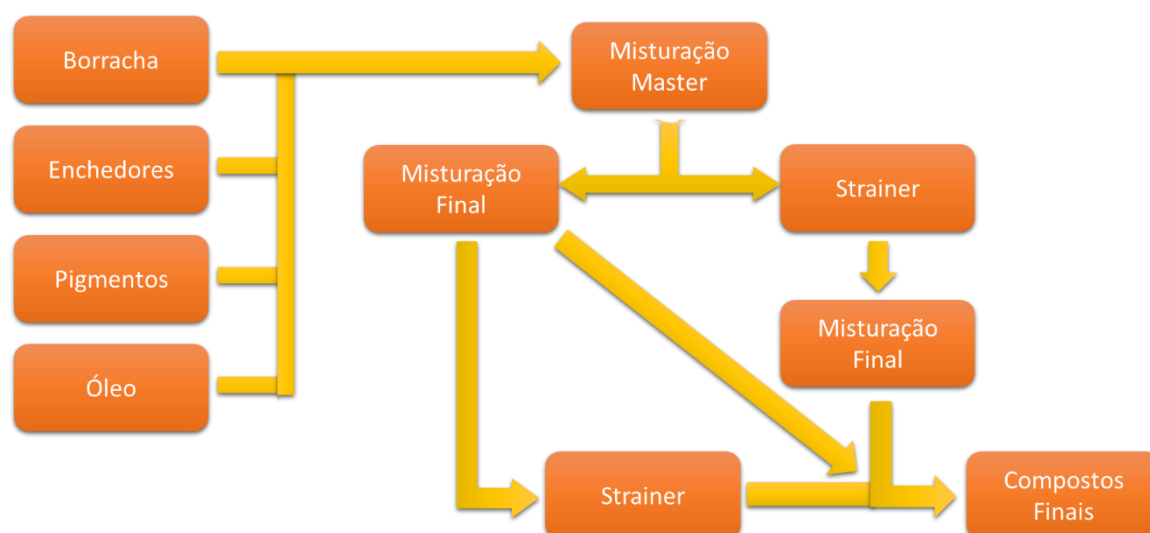


Figura 3.1 Diagrama das etapas do processo de misturação

Para iniciar o processo, é necessário definir a receita de fabrico para a produção de um composto intermédio (Misturação Master) ou final (Misturação Final), e para tal são seleccionadas as matérias-primas a utilizar.

As matérias-primas utilizadas podem ser:

- Borrachas: são os componentes base dos compostos a produzir, podendo ser de origem natural ou sintética.

- Enchedores: são os componentes que melhoram as propriedades do composto, como a dureza, resistência ao desgaste, à abrasão e ao rasgo, encontrando-se como principais o negro de fumo, a sílica e o carbonato de cálcio.
- Pigmentos: neste grupo encontram-se os anti-degradantes (antioxidantes, antiozonantes e ceras), ativadores (óxidos de zinco, ácido esteárico e estearato de zinco) e aceleradores (aminas, guanidinas e sulfenamidas) da vulcanização e um agente vulcanizante (enxofre).
- Óleos: constituem os ajudantes de processamento (Óleos amaciadores, plastificadores e promotores de adesividade).

As matérias-primas a utilizar e respetivas quantidades encontram-se previamente definidas segundo a receita do composto que se pretende produzir.

Definida a receita de fabrico, as matérias-primas irão ser sujeitas a diferentes etapas até se obter o composto final. Existem três etapas distintas, a misturação master, misturação final e a *strainer*. Na misturação master é realizado o processamento de parte das matérias-primas para se obter o composto intermédio, ou seja, composto que ainda não contem todos os componentes necessários para poder seguir para as etapas seguintes do processo. Este composto intermédio é encaminhado para a misturação final para serem adicionados e misturados os restantes aditivos em falta, como é o caso de ativadores, aceleradores e agentes de vulcanização, obtendo-se o composto final. Dependendo das características e especificações dos compostos intermédios e finais obtidos, estes podem ser encaminhados para a *strainer*, que terá como função filtrar os materiais estranhos no composto e melhorar as suas características, para poder ser utilizado nas seguintes etapas do processo. Esta etapa é opcional, sendo apenas realizada consoante as características dos compostos obtidos e da sua finalidade. Na *strainer* é também realizado o aproveitamento de compostos que foram descartados ou danificados em etapas seguintes do processo, podendo ser recuperados compostos vulcanizados, dependendo do seu grau de vulcanização.

3.1.1 Misturação Master

A máquina de misturação master é composta por diferentes unidades, cada uma delas com uma função específica para se obter o composto intermédio. As unidades, apresentadas na Figura 3.2, são, o sistema de transporte e pesagem das matérias-primas, o corpo do misturador, a extrusora, a calandra, o moinho de homogeneização, o banho antiaderente, o batch-off e o sistema de transporte e empilhamento.

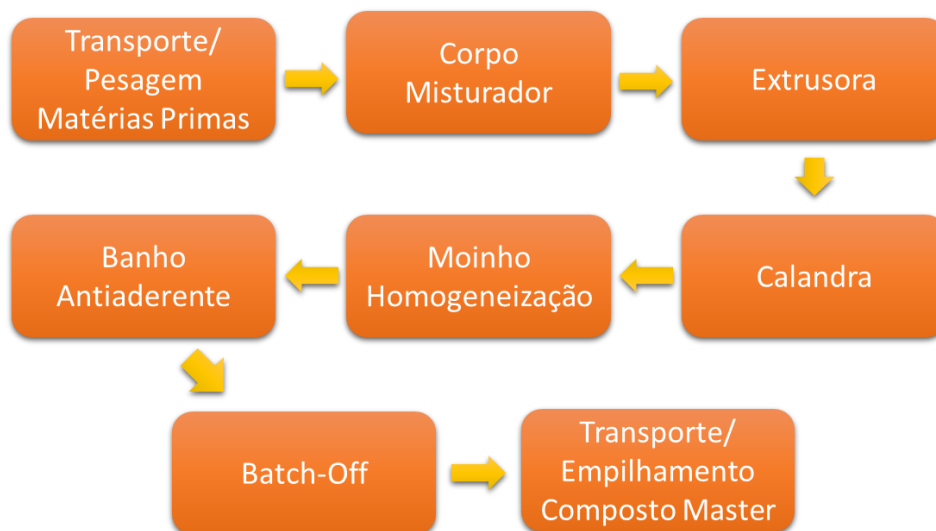


Figura 3.2 Esquema das etapas e componentes do misturador master

Realizando uma explicação mais detalhada de cada componente do misturador, tem-se:

Corpo do Misturador

O corpo do misturador constitui o elemento chave de todo o processo de mistura, sendo este o responsável pela mistura e homogeneização inicial das matérias-primas. Os diversos componentes que o constituem encontram-se representados na Figura 3.3.

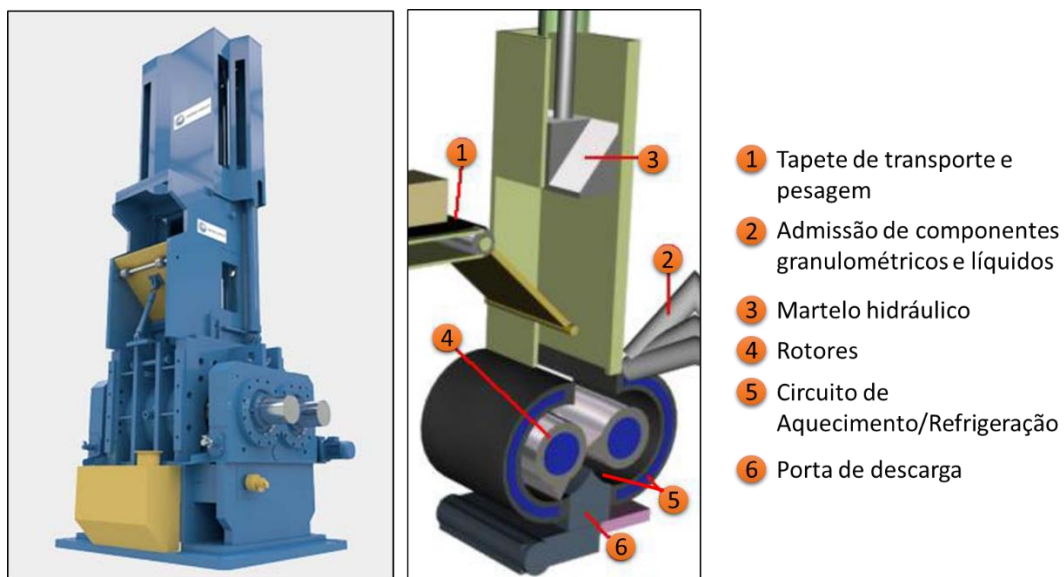


Figura 3.3 Representação dos diferentes componentes do corpo do misturador (HF Mixing Group, 2017).

Analisando a Figura 3.3, o corpo do misturador possui uma porta de alimentação, através da qual um tapete transportador introduz algumas das matérias-primas a serem misturadas. Dois rotores de quatro asas a operar a velocidades iguais em direções opostas, que proporcionam a mistura de todos os componentes; um martelo hidráulico, que força os componentes contra os rotores auxiliando na mistura, e uma porta de descarga, sendo o local por onde o composto misturado é descarregado. Devido às especificações de temperatura do processo, existem três sondas de temperatura (PT100) localizadas no corpo do misturador que medem a temperatura do composto a misturar. Cada componente (corpo do misturador, rotores, porta de descarga e martelo hidráulico) possui uma unidade de controlo de temperatura (TCU), que regula este parâmetro para que se encontre dentro de uma gama de valores estabelecidos, de forma que todo o processo possa ocorrer sem problemas. Cada TCU consiste num circuito de água fechado que circula entre o componente da máquina a arrefecer/aquecer e a respetiva TCU, ajustando a sua temperatura consoante as necessidades do processo. Na Figura 3.4 encontra-se representado o circuito de uma unidade de controlo de temperatura (TCU).

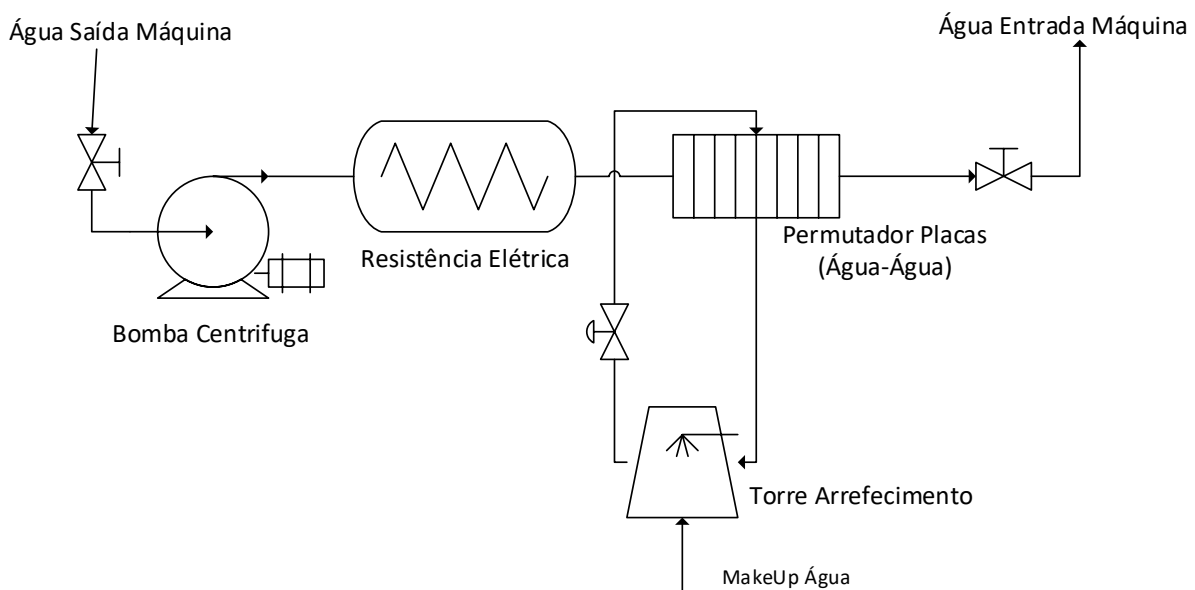


Figura 3.4 Esquema representativo de uma TCU.

Realizando uma explicação sucinta do funcionamento de uma TCU, a água proveniente de um determinado componente do misturador dá entrada na respetiva unidade de controlo, sendo medida a sua temperatura e comunicada ao controlador, que compara esta com a temperatura de referência (set-point). No caso da temperatura medida ser inferior à de

referência, o controlador liga a resistência elétrica e fecha a válvula de alimentação de água de arrefecimento, aumentando assim a temperatura da corrente de água que irá passar pelo permutador sem ocorrer a permuta de calor, e posteriormente seguir para a máquina. Caso a temperatura seja superior, a resistência irá permanecer desligada, abrindo a válvula de alimentação de água de arrefecimento, diminuindo assim a temperatura da corrente através da permuta de calor num permutador de placas.

Para além do tapete de transporte de matéria-prima, certos componentes como o negro de fumo, sílica e óleo, são inseridos automaticamente seguindo a receita de fabrico na camara de mistura, através de sistemas de transporte e admissão automáticos.

À parte destes componentes, existe um sistema de aspiração acoplado à camara de mistura que aspira as partículas como o negro de fumo/sílica existente neste compartimento que não se misturaram e se encontram dispersos. Esta aspiração ocorre quando se dá a abertura da porta de alimentação, prevenindo que o negro de fumo ou sílica seja despejado para o ar ambiente. Estes componentes são recuperados em coletores de aspiração (Figura 3.5) sendo posteriormente colocados em recipientes próprios, designados de “Big Bags”, sendo possível reutilizar em futuras receitas de fabrico.



Figura 3.5 Coletor de aspiração acoplado à camara de mistura do misturador.

Extrusora e Calandra

Realizada a mistura e a incorporação de todas as matérias-primas definidas pela receita, o composto resultante irá dar entrada numa extrusora, passando posteriormente por uma calandra. Na Figura 3.6 encontra-se representada a configuração da extrusora e calandra, com o respetivo posicionamento.

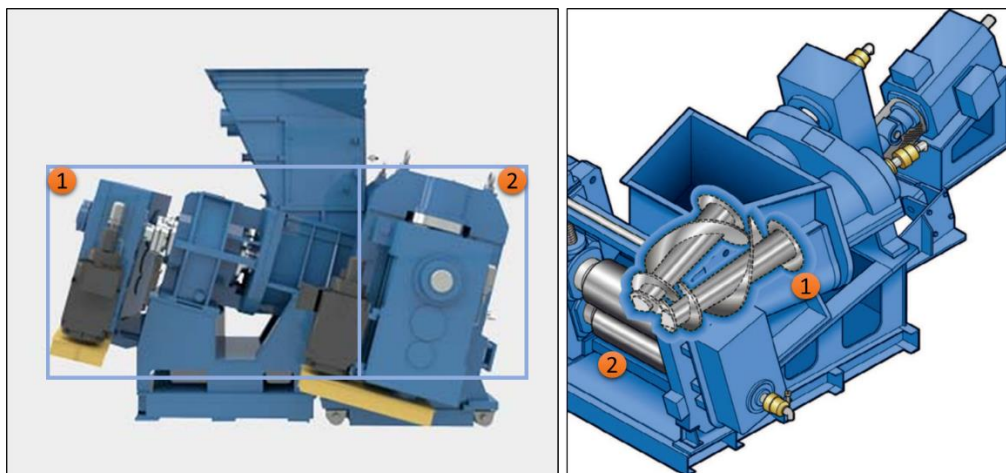


Figura 3.6 Configuração da extrusora (1) e calandra (2) na máquina de misturação master (HF Mixing Group, 2017; RubberMW, 2015).

A extrusora encontra-se posicionada abaixo da porta de descarga do corpo do misturador, e recebe o composto resultante da camara de mistura realizando a sua homogeneização. Esta consiste em dois parafusos em que a sua rotação é realizada em sentidos opostos no sentido do centro, a uma velocidade variável consoante a quantidade de composto que se encontra em processamento. Para ser possível uma boa homogeneização, estes parafusos possuem um controlo de temperatura realizado através de uma TCU. A temperatura deverá estar na ordem dos 70°C no caso de o composto possuir sílica na sua composição, e nos 40°C para compostos sem sílica. Isto deve-se ao facto dos compostos com sílica serem sensíveis a variações bruscas de temperatura, uma vez que a temperatura da porta de descarga do misturador ronda os 70-80°C no momento da ejeção do composto.

Após a homogeneização do composto, este será encaminhado para uma calandra, em que um conjunto de dois rolos sobrepostos irão prensar o composto proveniente da extrusão, com o intuito de criar uma folha continua com a espessura e largura desejadas, como representado na Figura 3.7. Analogamente aos restantes componentes da máquina, estes rolos possuem uma unidade de controlo de temperatura, de forma a manter a temperatura de ambos os rolos nos 50°C para compostos com sílica e nos 40°C para compostos sem sílica.



Figura 3.7 Configuração dos rolos da calandra na máquina de mistura master (HF Mixing Group, 2017).

Moinho de homogeneização

O composto calandrado dará entrada num moinho composto por dois cilindros, em que a sua velocidade é variável e ajustável pelo operador durante o processo. Para além dos cilindros, existe um conjunto de lâminas de corte que permitem que a borracha seja encaminhada através de um rolo homogeneizador, direcionando-a novamente para o moinho, o que proporciona uma melhor mistura. Por fim o composto é cortado nas dimensões desejadas, sendo enviado na forma de folha contínua para o banho antiaderente. Na Figura 3.8 encontra-se representado esse moinho.



Figura 3.8 Configuração dos rolos do moinho de homogeneização na máquina de mistura master (HF Mixing Group, 2017).

Nesta etapa, cada cilindro possui um controlo de temperatura acoplado (TCU), devendo o rolo frontal encontrar-se a 30°C, e o anterior a 60°C, para que o composto de borracha adira ao rolo frontal e seja encaminhado para a etapa seguinte.

Tanque de banho e Batch-off

Finalizado o processo de homogeneização do composto, e dada a forma e dimensão desejada, este será sujeito a um banho com uma solução antiaderente, de forma a facilitar o processo de empilhamento do composto, para posterior uso nas etapas seguintes. Aplicado o banho, o composto irá passar por um sistema de secagem da solução aplicada e respetivo arrefecimento da borracha, através de ventiladores a funcionar automaticamente quando detetam a presença do composto. A esta etapa de secagem e arrefecimento dá-se o nome de batch-off. Na Figura 3.9 e Figura 3.10 encontra-se representada a configuração da unidade, como também o trajeto que o composto percorre no seu interior.

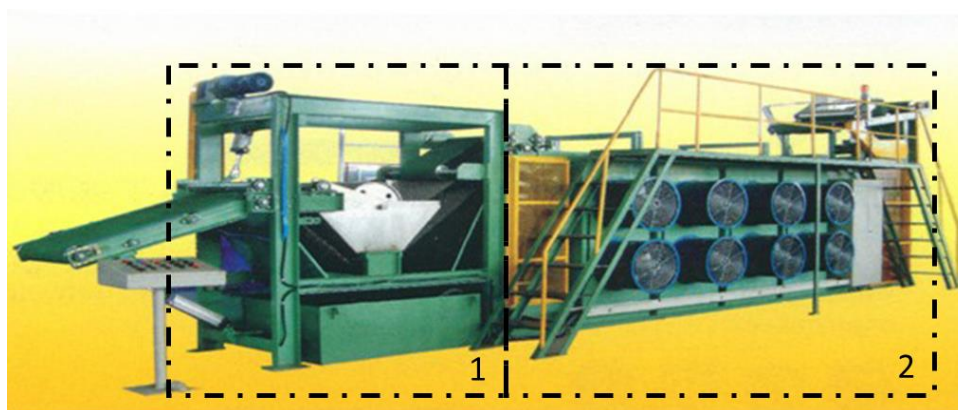


Figura 3.9 Configuração do tanque de banho antiaderente (1) e batch-off (2) (Reshine, 2013).

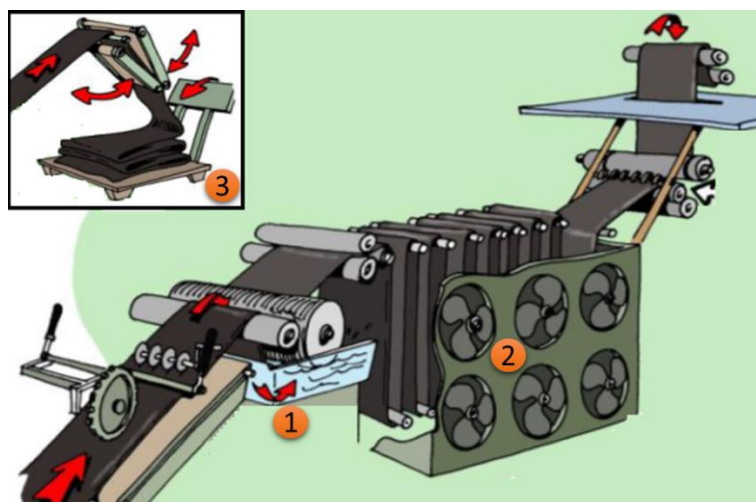


Figura 3.10 Demonstração do percurso do composto desde o banho antiaderente (1) até ao seu empilhamento final (3).

Sistema de transporte e empilhamento

Realizado o acabamento do composto, este será transportado através de tapetes para a zona de empilhamento, ponto 3 da Figura 3.10, onde será colocado em mesas próprias às camadas, Figura 3.11, pronto para ser transportado e armazenado, para futuro uso. O composto não deverá possuir uma temperatura final, no momento do seu empilhamento, superior a 40 °C, por questões de segurança.



Figura 3.11 Posicionamento de um composto master/final numa mesa de empilhamento.

Em termos de layout global da máquina, os diferentes componentes que a constituem encontram-se distribuídos por diferentes andares, como representado na Figura 3.12. Realizando a sua análise, encontram-se representados com o número 1 os silos de armazenamento diário, onde são armazenadas matérias-primas como o negro de fumo, sílica, e outros componentes granulosos ou líquidos. No número 2 tem-se o sistema de transporte e pesagem das restantes matérias-primas em bruto, como é o caso das borrachas e pigmentos. Após este, encontra-se o corpo do misturador com o número 3, a extrusora, calandra e moinho de homogeneização com os números 4,5 e 6 respetivamente, e por fim o banho antiaderente, batch-off e sistema de transporte e empilhamento com a numeração 7, 8 e 9.

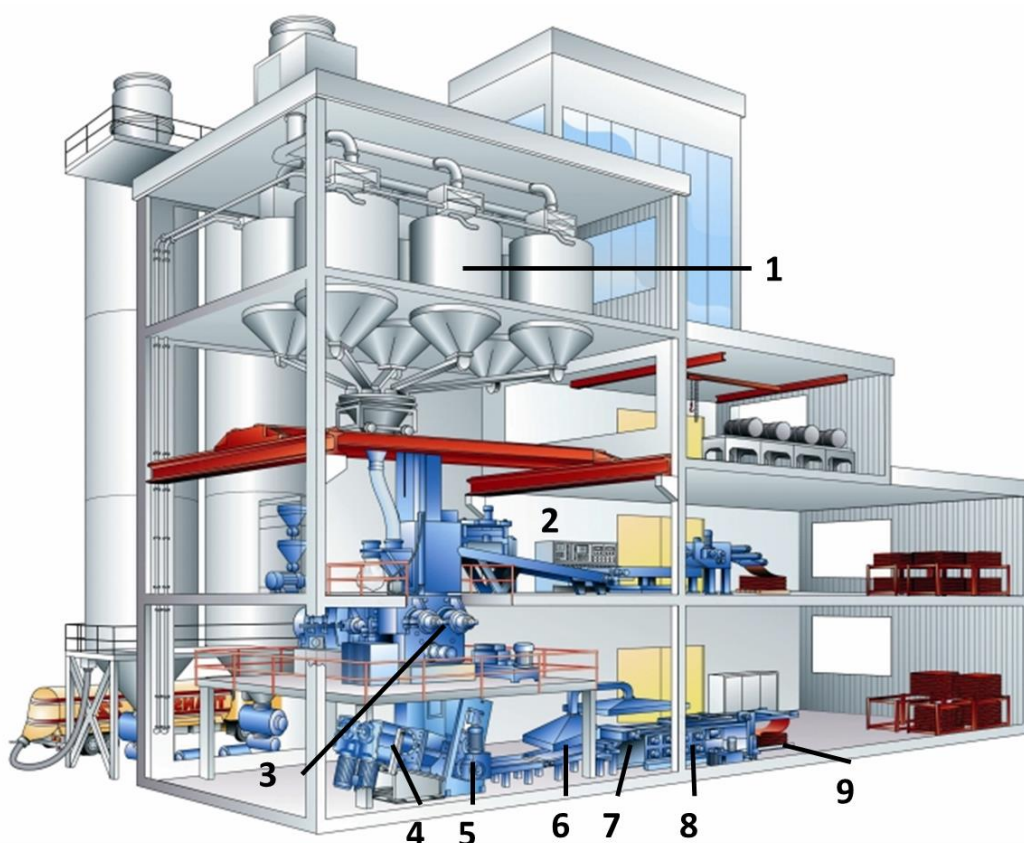


Figura 3.12 Representação do posicionamento dos diferentes componentes de um misturador
(Adaptado de (Warrier, 2015)).

Todo o processo de misturação, desde as matérias-primas até ao composto final é realizado de forma contínua e autónoma, sendo apenas efetuada a alimentação das matérias-primas por parte dos operadores. Estes são também responsáveis por monitorizar todas as etapas, de forma a assegurar que todo o processo ocorre sem problemas. À parte disso, estas máquinas possuem um regime de funcionamento contínuo, operando 24 sobre 24 horas, parando apenas para que seja realizada manutenção preventiva, com duração de 8 horas, ou em caso de avaria. No decorrer da manutenção são desligados todos os equipamentos principais e auxiliares, sendo que no caso de avaria, os componentes do misturador mantêm-se em standby, prontos a arrancar imediatamente após a avaria ser resolvida.

3.1.2 Misturação Final

Na misturação final, é realizada a incorporação de aditivos no composto master proveniente da misturação master, como é o caso dos ativadores e aceleradores de

vulcanização e do agente vulcanizante, mais concretamente o enxofre. A adição destes compostos tem de ser realizada em etapas de mistura diferentes, devido às condições operatórias de cada processo. No caso da mistura master, as temperaturas de mistura encontram-se compreendidas entre os 145 °C e os 170 °C, enquanto que na mistura final esta temperatura não deve exceder os 115 °C, uma vez que para temperaturas acima destas, o composto corre o risco de iniciar o processo de vulcanização, não podendo ser utilizado nas seguintes etapas da construção do pneu.

Em termos das unidades que fazem parte do misturador final, estas diferem em alguns aspetos relativamente ao misturador master descrito anteriormente, como se pode ver no esquema da Figura 3.13. Este tipo de misturador não contém uma extrusora e calandra à saída do corpo do misturador, mas sim dois moinhos, um de descarga e um segundo de acabamento. Ambos os moinhos são idênticos ao moinho de homogeneização presente no misturador master, diferenciando nas condições de funcionamento, mais concretamente nas velocidades de rotação dos rolos, originando coeficientes de fricção entre o composto e os rolos distintos.

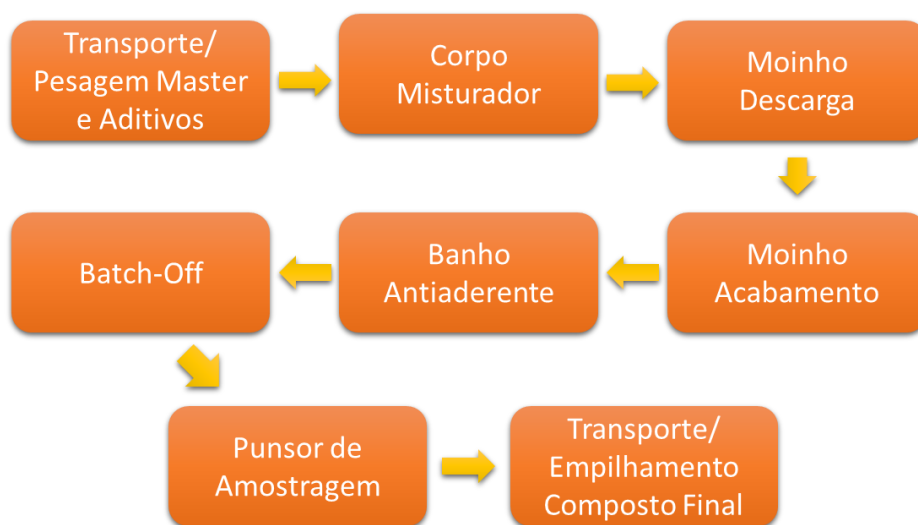


Figura 3.13 Esquema das etapas e componentes do misturador final

Para além destes componentes, após a unidade de banho antiaderente e batch-off, este misturador possui um punso de amostragem, que permite a recolha automática de amostras com dimensões definidas, que serão posteriormente analisadas para avaliar a qualidade do composto final produzido.

Em termos de layout da máquina, esta segue a mesma estrutura que o misturador master apresentado na Figura 3.12, diferenciando apenas nos elementos que a compõem, como mencionado anteriormente.

3.2 Sistema de transporte e armazenamento de negro de fumo

No processo de fabrico do pneu, o negro de fumo é uma das matérias-primas fundamentais, sendo usado em todos os tipos de pneus. Este composto é o responsável pela coloração preta característica dos pneus, mas o seu uso não se deve única e simplesmente a este fator. Visto se tratar de um enchedor, o seu uso deve-se ao facto de proporcionar o aumento das propriedades mecânicas do pneu, como a dureza, tenacidade, rigidez, resistência à abrasão, propriedades dinâmicas, etc. e ao mesmo tempo diminuir o custo de fabrico e preço de venda do pneu. O negro de fumo é um material essencialmente constituído por carbono elementar sob forma de partículas de geometria aproximadamente esférica, de diâmetro máximo inferior a $1\mu\text{m}$, formando entre si um agregado de partículas. É obtido através da conversão de hidrocarbonetos líquidos ou gasosos em carbono elementar e hidrogénio, por combustão parcial ou decomposição térmica (Gomes, s.d.).

Uma vez que se trata uma das matérias-primas mais importantes no processo de fabrico, é essencial assegurar um fornecimento contínuo deste composto, sendo necessário um sistema de armazenamento e transporte eficiente.

3.2.1 Sistema de armazenamento de negro de fumo

O transporte de negro de fumo é assegurado através de ar comprimido, ou seja, por transporte pneumático. A fábrica utiliza cinco negros de fumo distintos, cada um com características e propriedades diferentes, que podem ser incorporados no processo de fabrico, consoante o tipo de pneu a produzir. Devido às diferentes características de cada tipo de negro de fumo, o seu armazenamento tem de ser realizado em silos específicos para cada um, não devendo haver a mistura destes no processo de transporte do mesmo.

Relativamente ao sistema de armazenamento de negro de fumo, este é constituído por 2 grupos de silos, os mensais (Figura 3.14) e os diários (Figura 3.15). Os silos mensais consistem num conjunto de dez silos de armazenamento exteriores, que possuem uma capacidade entre 30 a 40 toneladas cada. Estes possuem diferentes negros de fumo, de forma a assegurar as quantidades necessárias para todas as receitas de fabrico previstas.

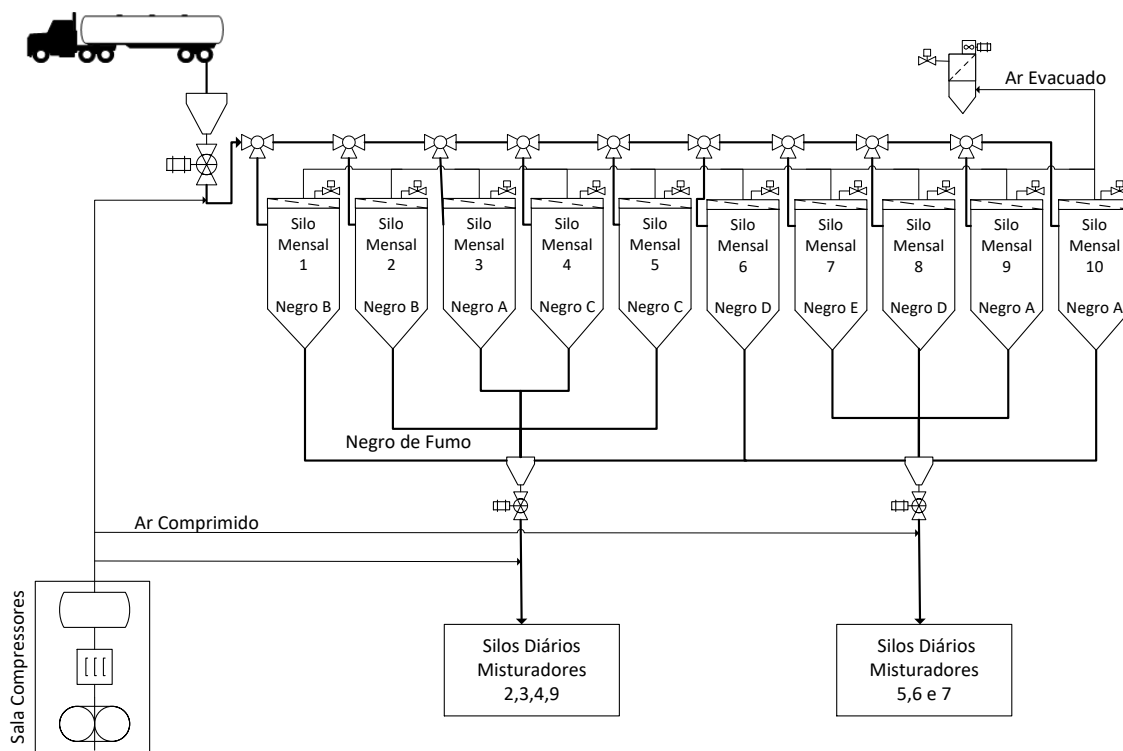


Figura 3.14 Esquema do sistema de transporte e armazenamento exterior

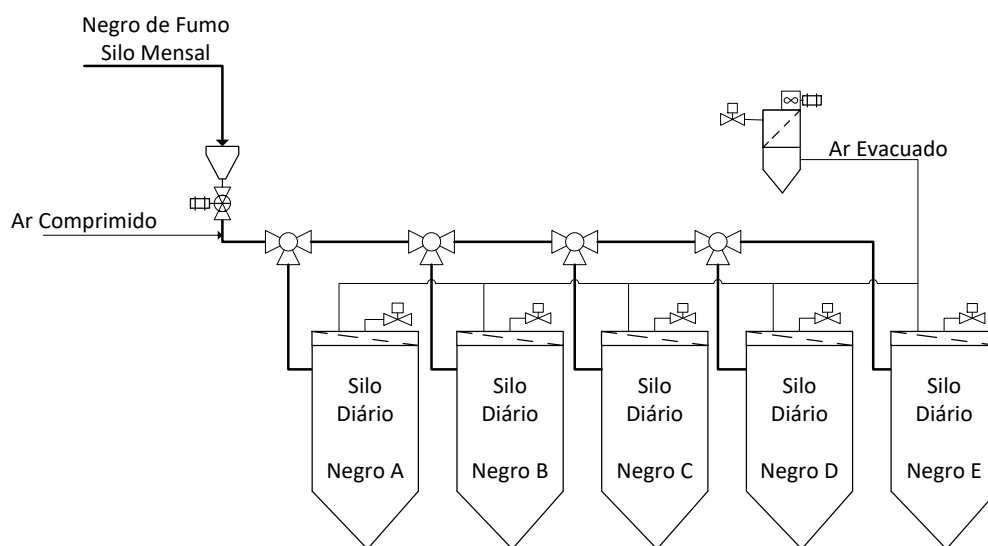


Figura 3.15 Esquema do sistema de transporte e armazenamento interior de um misturador

Os silos diários consistem em silos de menores dimensões (capacidade de 3 a 4 toneladas cada), que se encontram localizados por cima de cada misturador (como representado na Figura 3.12), de forma a facilitar o doseamento deste componente. Cada misturador possui um número definido de silos diários, cada um com um tipo de negro de fumo diferente, consoante os diferentes tipos de compostos que são produzidos em cada misturador. O número de silos diários varia de misturador para misturador, consoante os tipos de negro de fumo necessários em cada um, existindo no total 17 destes silos em funcionamento, distribuídos pelos diversos misturadores existentes.

3.2.2 Sistema de transporte de negro de fumo

O fornecimento de negro de fumo às instalações da empresa é realizado através de camiões cisterna, sendo que estes descarregam o negro através de uma estação de descarga constituída por uma tubagem presente no solo, na qual existe uma tremonha seguida de uma válvula rotativa que faz a admissão deste na respetiva tubagem de transporte (Figura 3.16).



Figura 3.16 Mecanismo de admissão de negro de fumo na tubagem de transporte.

A tubagem de transporte é alimentada com ar comprimido, responsável por arrastar o negro de fumo, sendo então encaminhado para o respetivo silo mensal. Na instalação existem duas estações de descarga, cada uma com a respetiva tubagem de transporte, sendo que a estação 1 alimenta os silos mensais numerados de 1 a 6, e a estação 2 os silos 7 a 10. Apesar disso, cada tubagem de transporte entre o camião e os silos mensais, é responsável por assegurar o transporte de todo o tipo de negros de fumo. É então de extrema importância que

após cada transporte seja realizada a limpeza da mesma, sendo esta alcançada através da passagem de ar comprimido na tubagem após o transporte de um determinado negro de fumo ser concluído, garantindo assim que todo este é retirado da tubagem. No silo, o negro de fumo é armazenado, sendo o ar comprimido usado no transporte evacuado, de forma a não pressurizar o silo.

Desde o silo mensal até aos silos diários, o transporte é realizado seguindo o mesmo princípio de funcionamento, sendo também necessário assegurar que não ocorre a mistura dos diferentes tipos de negros na tubagem de transporte (neste caso existem duas tubagens de transporte, cada uma transporta para diferentes misturadores como representado na Figura 3.14). Para além destes componentes, no decorrer de toda a tubagem de transporte, tanto desde o camião cisterna até ao silo mensal como deste para os silos diários, existem pontos de injeção automática de ar comprimido, designados de bypass, para impedir a ocorrência de acumulação de negro no seu interior, auxiliando assim o transporte. Estes pontos de injeção automática (Figura 3.17) encontram-se ligados a manómetros, que medem a pressão no interior da tubagem de transporte, sendo acionados quando a pressão atingir valores baixos, o que indica a acumulação de negro de fumo e consequente abaixamento da pressão na linha de transporte.



Figura 3.17 Tubagem de transporte de negro de fumo e mecanismo bypass.

Encontrando-se o respetivo negro de fumo armazenado no silo diário, este encontra-se pronto a ser utilizado. À saída de cada silo diário, existe um parafuso sem fim que arrasta o negro desde o silo até uma balança (Figura 3.18), na qual será pesado e posteriormente injetado no misturador, consoante a receita de fabrico.



Figura 3.18 Mecanismo de doseamento de negro de fumo e pesagem nos silos diários.

Devido à utilização de ar comprimido para o transporte de negro de fumo, existe a necessidade em evacuar este ar dos silos, mas mantendo o negro no seu interior. Para tal, todos os silos encontram-se equipados com um mecanismo de filtração, através de mangas (Figura 3.19), que permitem a passagem do ar e retêm o negro no seu interior. Este mecanismo de retenção do negro de fumo é essencial para o bom funcionamento do transporte, mas origina problemas de sobrepressão no interior dos silos, devido à colmatação das mangas. Para solucionar este problema, cada silo possui um sistema de limpeza automática das mangas, em que são realizados sopros/disparos de ar comprimido nas mangas para remover o negro presente. Esta limpeza ocorre apenas quando se encontra a ser realizado o transporte de negro para um determinado silo, sendo os disparos de ar para limpeza realizados com um intervalo de tempo definido, de forma a desobstruir as mangas.

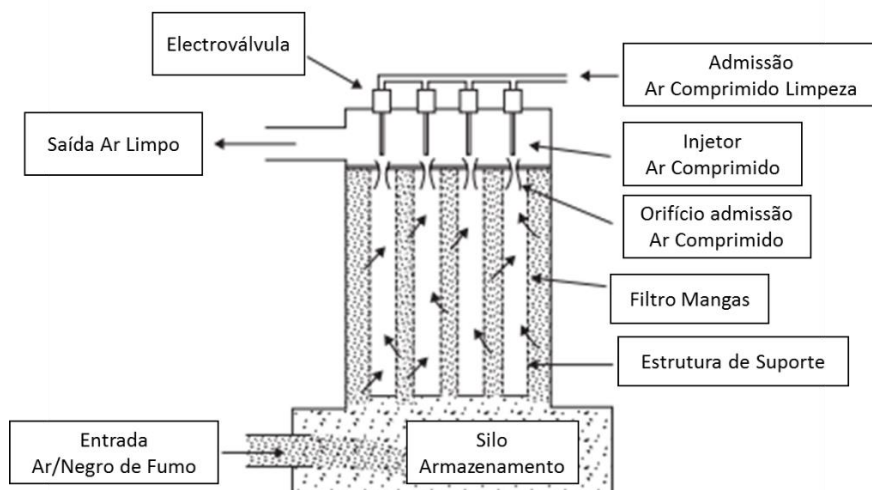


Figura 3.19 Representação do sistema de filtração de negro de fumo nos silos mensais e diários, e respetivo mecanismo de limpeza (Mills, 2004).

3.2.3 Sistema de produção e tratamento de ar comprimido

Relativamente ao ar comprimido responsável pelo transporte, na instalação existe uma rede de ar comprimido específica para este fim, designada de central de negro de fumo, à parte da rede principal de ar comprimido de 6 barg da fábrica.

A central de negro de fumo é constituída por cinco compressores, responsáveis por produzir o ar comprimido necessário a todo o transporte, tanto desde o camião cisterna para os silos mensais, como destes para os silos diários. Na Tabela 3.1 encontram-se as características dos compressores que compõem essa central.

Tabela 3.1 Características dos compressores da central de negro de fumo.

Designação	Potência Motor (kW)	Capacidade (m ³ (PTN)/h)	Pressão Funcionamento (barg)	Controlo Implementado
Compressor 1	75	766	7,5	Carga/Vazio
Compressor 2	75	766	7,5	Carga/Vazio
Compressor 3	75	791	7,5	Carga/Vazio
Compressor 4	75	763	7,5	Carga/Vazio
Compressor 5	75	768	7,5	Carga/Vazio
Total	375	3854	-	-

Em termos do controlo implementado, os diferentes compressores da central possuem parâmetros distintos e são controlados através do sistema carga/vazio. Neste sistema os compressores possuem dois patamares de pressão estabelecidos, uma pressão mínima, na qual o compressor entra em carga, comprimindo ar para a rede, e uma pressão máxima, a partir da qual o compressor passa a funcionar em vazio, continuando a operar a uma velocidade mais baixa sem comprimir ar para a rede. Estando o compressor em vazio, este encontra-se numa situação de espera, com menor consumo, até a pressão na rede atingir novamente o patamar de pressão mínima, ou exceder o tempo de vazio máximo definido no compressor, desligando após esse período de tempo.

Para além dos compressores, que se encontram equipados com secadores de refrigeração de 1,2 kW de potência cada, existem na central dois reservatórios com a capacidade conjunta de 10 m³, capazes de armazenar o ar comprimido necessário ao arranque do transporte de negro de fumo sem provocar uma queda brusca na pressão da rede, e filtros de tratamento para a remoção de partículas e óleo presente no ar. O tratamento do ar comprimido produzido é de extrema importância, uma vez que a possível contaminação do negro de fumo, pode originar problemas no fabrico dos respetivos compostos. Na Figura 3.20 encontra-se representada a central, com os respetivos componentes que a constituem.

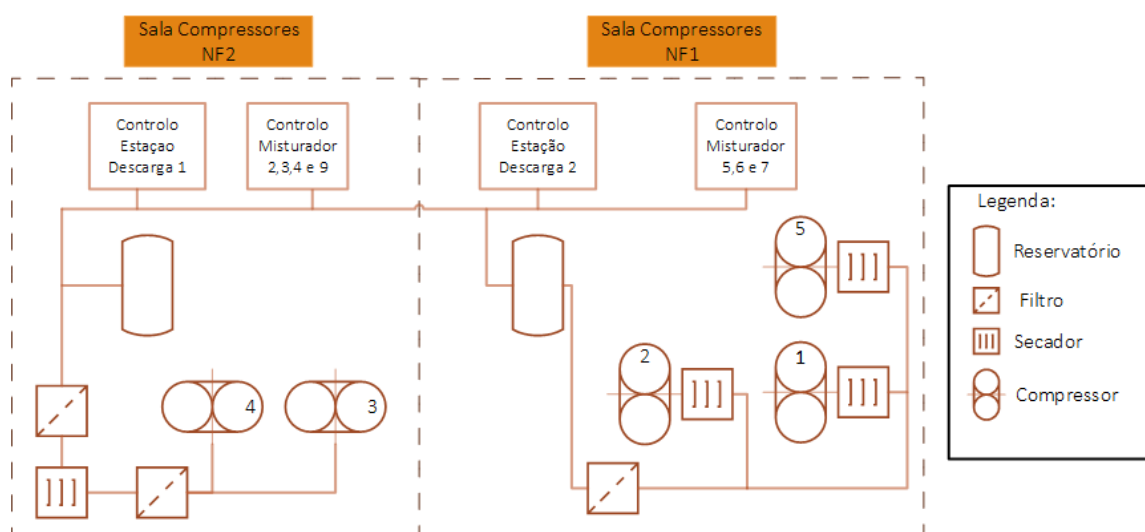


Figura 3.20 Representação da central de negro de fumo.

Todos os componentes descritos anteriormente, apenas constituem o sistema de produção e tratamento de ar comprimido. Após estes, o ar é distribuído para quatro sistemas de controlo (Figura 3.21), cada um ligado a uma tubagem de transporte de negro de fumo e outra auxiliar para injeção de ar bypass. O sistema de controlo será o responsável por controlar o caudal de ar que é admitido nessas tubagens, através da monitorização da pressão de ar existente nelas, ajustando o caudal consoante o valor de referência definido, de forma a manter as condições de transporte constantes. Todo o controlo implementado tem como objetivo limitar o transporte a uma velocidade de 6 m/s, sendo este realizado em regime de fase densa, de forma a não comprometer a qualidade do negro de fumo transportado, e reduzir a quantidade de ar comprimido necessária por tonelada de negro de fumo transportado. A seleção deste modo de transporte, por fase densa, prende-se não só ao facto de serem necessários menores caudais de ar comprimido, mas também como fator de segurança para que não ocorra a danificação das matérias-primas. O transporte em regime de fase diluída

exige maiores caudais de ar para responder às quedas de pressão existentes na tubagem de transporte, o que conseqüentemente origina velocidades de transporte superiores, levando a um atrito maior da matéria-prima com a tubagem. A pressão mínima de funcionamento do sistema de controlo para o ar comprimido alimentado é de 4,5 barg, sendo esta pressão ajustada através de reguladores de pressão.

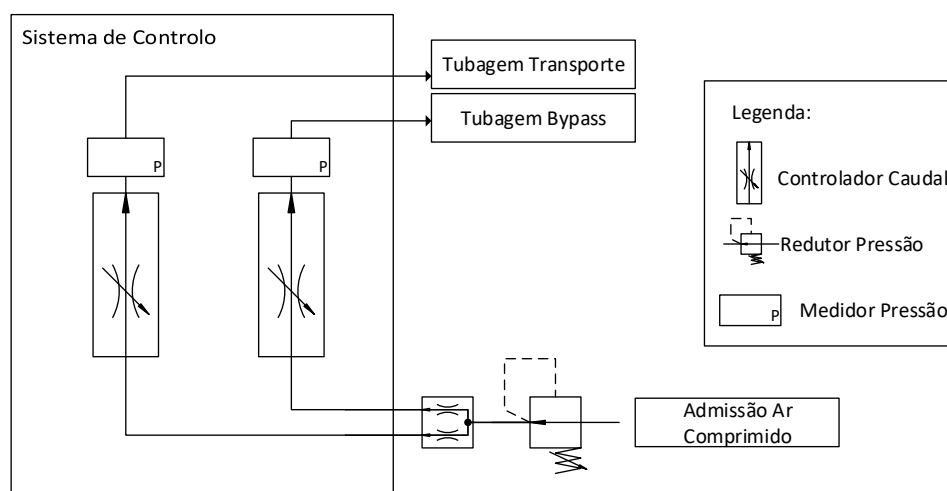


Figura 3.21 Representação dos componentes do sistema de controlo do transporte de negro de fumo.

4 Levantamentos Energéticos

No presente capítulo são apresentados os valores de produção e levantamentos energéticos realizados à unidade fabril, no que diz respeito às utilidades energéticas consumidas no ano de 2016, correspondente a um período de laboração de 350 dias, como é o caso da eletricidade, vapor e ar comprimido (apesar da produção de ar comprimido advir de um consumo elétrico por parte de compressores, no estudo realizado foi separada a energia elétrica resultante dessa produção e dos restantes equipamentos existentes na empresa, de forma a comparar em termos de utilidades). No seguimento da análise desses dados, será apresentada uma avaliação mais concreta dos sectores em estudo nesta dissertação, como é o caso dos misturadores e do transporte de negro de fumo. Todos os dados recolhidos relativamente a consumos energéticos apresentados neste capítulo, foram obtidos através do software de monitorização MESSDAS utilizado na empresa.

4.1 Produção e consumo total da Continental Mabor

De forma a ser possível avaliar o desempenho da empresa em termos energéticos, e enquadrá-la num patamar de consumo, foi necessário determinar o consumo específico da mesma. Com esse intuito, inicialmente foi realizado o levantamento dos valores de produção anual obtidos pela Continental Mabor no ano de 2016, que se encontram representados na Figura 4.1.

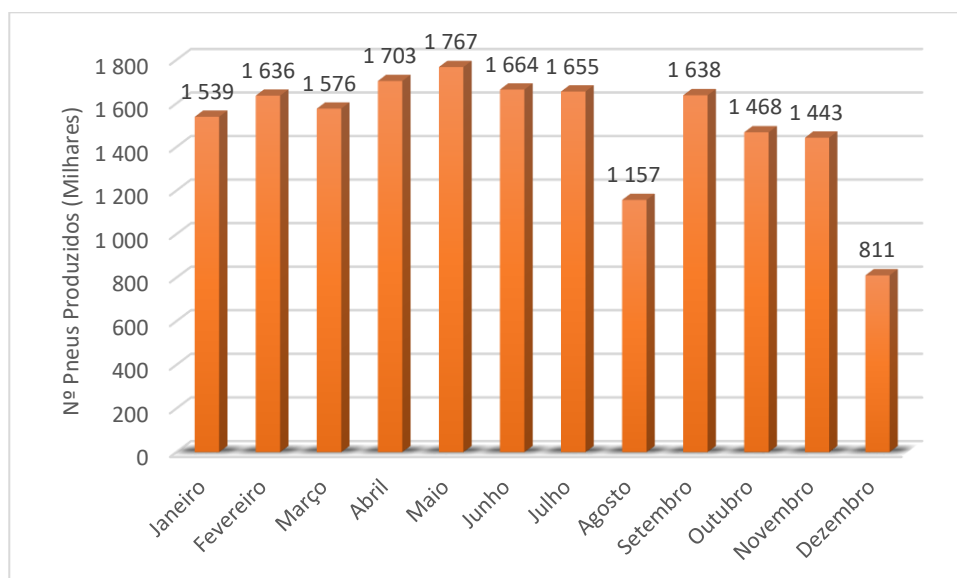


Figura 4.1 Representação da produção mensal de pneus obtida pela Continental Mabor no ano de 2016.

Através da análise da Figura 4.1, verifica-se que a empresa apresentou uma produção maioritariamente uniforme ao longo do ano, à exceção dos meses de Agosto e Dezembro, devido às paragens gerais programadas nestes meses para a realização de manutenção. Apesar disso, ao longo do ano de 2016, foram produzidos no total aproximadamente 18 milhões de pneus, o que se traduziu numa média de 52 000 pneus por dia, encontrando-se dentro da estimativa esperada para este ano, superando os 50 000 pneus por dia.

De forma a ser possível alcançar estes valores de produção, foram necessários gastos em termos de utilidades energéticas, como é o caso da energia elétrica, essencial para alimentar todos os componentes elétricos, motores usados nas diferentes etapas e produção de ar comprimido, como também vapor vivo, usado na sua grande maioria na etapa de vulcanização. Na Figura 4.2 encontram-se representados os consumos mensais referentes a todas as utilidades, expressos em toneladas equivalentes de petróleo, no decorrer do ano de 2016. No anexo A podem ser consultados os dados recolhidos para os consumos das diferentes utilidades, como também o exemplo de cálculo para a conversão desses consumos em toneladas equivalentes de petróleo.

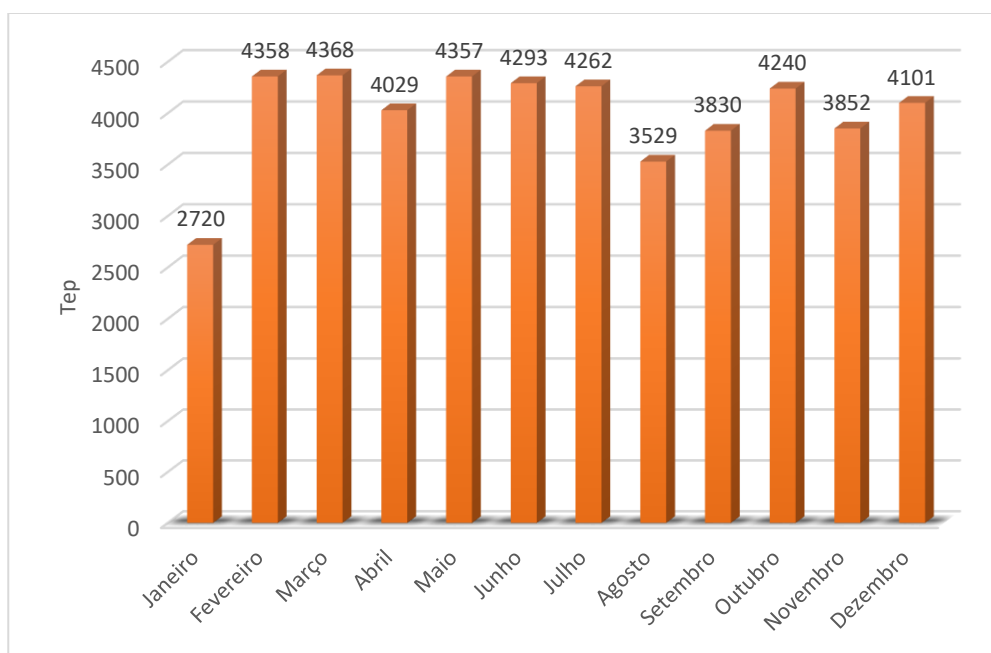


Figura 4.2 Representação do consumo mensal de energia obtida pela Continental Mabor no ano de 2016.

Na Figura 4.2 verifica-se que o consumo de energia ao longo do ano de 2016 teve poucas oscilações, apresentando um valor inferior aos restantes apenas no mês de Janeiro, apesar da produção obtida neste mês ser semelhante aos restantes.

Recolhidos todos os dados de consumos energéticos e produção por parte da Continental Mabor no ano de 2016, tornou-se possível determinar o seu consumo específico, encontrando-se representado na Figura 4.3.

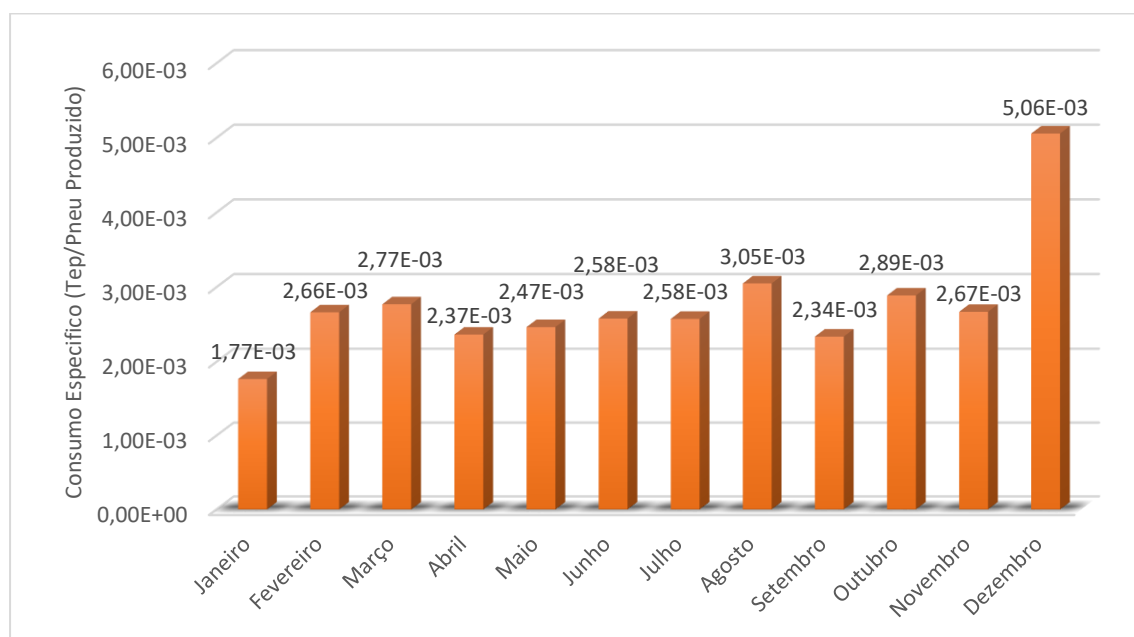


Figura 4.3 Representação dos consumos específicos mensais da Continental Mabor, no ano de 2016.

Através da análise da Figura 4.3, constata-se que à exceção dos meses de Janeiro e Dezembro, o consumo específico da empresa encontra-se sempre dentro da mesma gama de valores. No mês de Dezembro, apesar de se verificar o valor de produção mais baixo no ano de 2016, o consumo energético mantém-se praticamente constante, relativamente aos restantes meses, o que não vai de encontro com o esperado. Este facto poderá estar relacionado com a manutenção geral prevista para este mês ter exigido um consumo energético maior. No panorama anual, a Continental Mabor apresentou um consumo específico médio de 2,65E-3 Tep/pneu produzido.

Realizada a análise global da produção e consumos obtidos pela Continental Mabor, foi realizada uma avaliação mais ao detalhe de cada tipo de utilidade. Na Figura 4.4 encontram-

se representados os consumos totais relativos a cada uma dessas utilidades, expressos em toneladas equivalentes de petróleo.

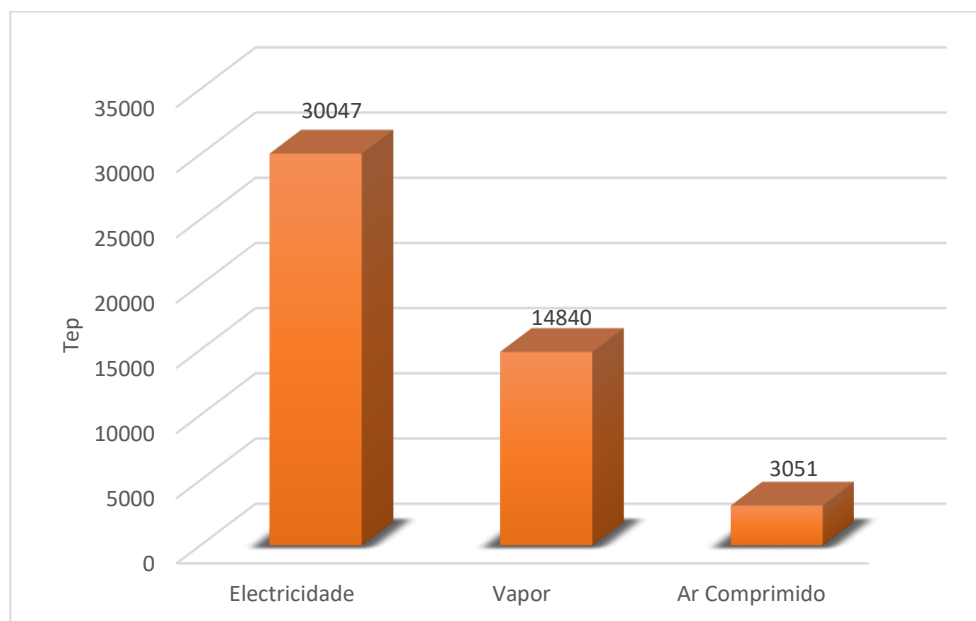


Figura 4.4 Consumos energéticos, expressos em toneladas equivalentes de petróleo, para as diferentes utilidades consumidas pela Continental Mabor no ano de 2016.

Analisando a Figura 4.4, verifica-se que o consumo em energia elétrica corresponde à grande maioria das utilidades consumidas, representando 69% da energia total consumida, dos quais 6% (3 051 Tep) são utilizados para a produção de ar comprimido. Relativamente ao consumo de vapor, este correspondeu a um peso de 31% (14 840 Tep) do consumo total da fábrica, sendo utilizado na sua maioria a uma pressão de 18 barg nos respetivos utilizadores. No caso do ar comprimido, na fábrica existem duas redes principais desta utilidade, uma de baixa pressão, correspondente a uma pressão de 6 barg, e outra de alta pressão, funcionando a uma pressão de 10 barg. Destas, a energia consumida para produzir ar comprimido para a rede de baixa pressão corresponde a 2 589 Tep (85%), enquanto que a rede de alta pressão corresponde aos restantes 462 Tep (15%).

Através da análise dos consumos das diferentes utilidades, tornou-se possível determinar os custos anuais associados a cada uma delas, encontrando-se estes representados na Figura 4.5. Relativamente aos custos unitário das diferentes utilidades, em termos de energia elétrica, a Continental Mabor possui um tarifário com um custo médio de 0,08 €/kWh, e para a produção de vapor um custo médio de 20 €/tonelada de vapor produzido.

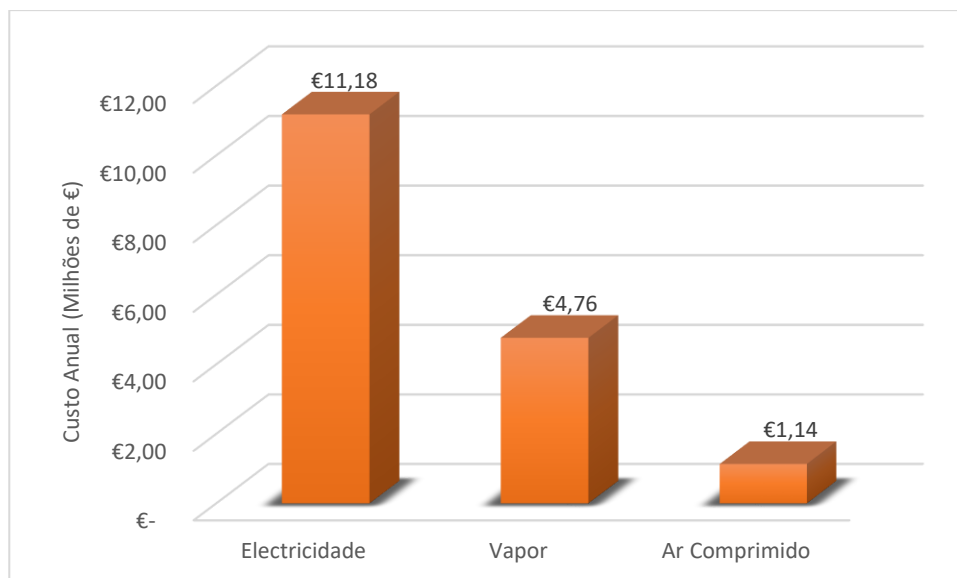


Figura 4.5 Representação dos custos associados às utilidades consumidas pela Continental Mabor no ano de 2016.

Analisando a Figura 4.5 verifica-se que os custos totais relativamente às utilidades consumidas ascendem aos 17 milhões de euros, o que evidencia o peso das utilidades nos custos da empresa. Em termos de produção, estes custos associados às utilidades equivaleram a 0,95 €/pneu produzido.

Em termos globais, a empresa apresentou um consumo energético anual de 48 000 Tep aproximadamente, e sendo este consumo superior a 500 Tep, a Continental Mabor encontra-se enquadrada como uma empresa consumidora intensiva de energia (CIE). Sendo assim é abrangida pelo sistema de gestão de consumos intensivos de energia (SGCIE), regulado pelo Decreto-Lei nº71/2008, de 15 de Abril. Para além disso, o consumo ascende os 1 000 Tep, o que implica que sejam realizadas auditorias de 6 em 6 anos logo após quatro meses do registo da mesma, sendo necessário a implementação de medidas que levem ao cumprimento das metas estabelecidas, no que diz respeito aos indicadores energéticos e de intensidade carbónica (SGCIE, 2008).

4.2 Consumos energéticos dos misturadores

A secção de mistura engloba um conjunto de 11 misturadores, dos quais parte deles produzem compostos master (Misturador 2,4,5,6 e 7) e os restantes produzem compostos finais (Misturador 0,1,3). Uma vez que se trata de uma das etapas em estudo, foi necessário avaliar os seus gastos em termos energéticos, de forma a enquadrar esta secção no consumo

geral da empresa. Em termos globais, os consumos por parte dos misturadores representam na sua maioria gastos em energia elétrica, no que diz respeito aos seus componentes principais, sendo utilizado ar comprimido para sistemas de controlo, como válvulas pneumáticas, para a etapa de empilhamento das cargas, e bombas pneumáticas, não tendo sido possível realizar o levantamento direto desses consumos, uma vez que não é realizada a sua monitorização através do software MESSDAS utilizado na empresa. Na Figura 4.6 encontram-se representados os consumos elétricos por parte dos misturadores.

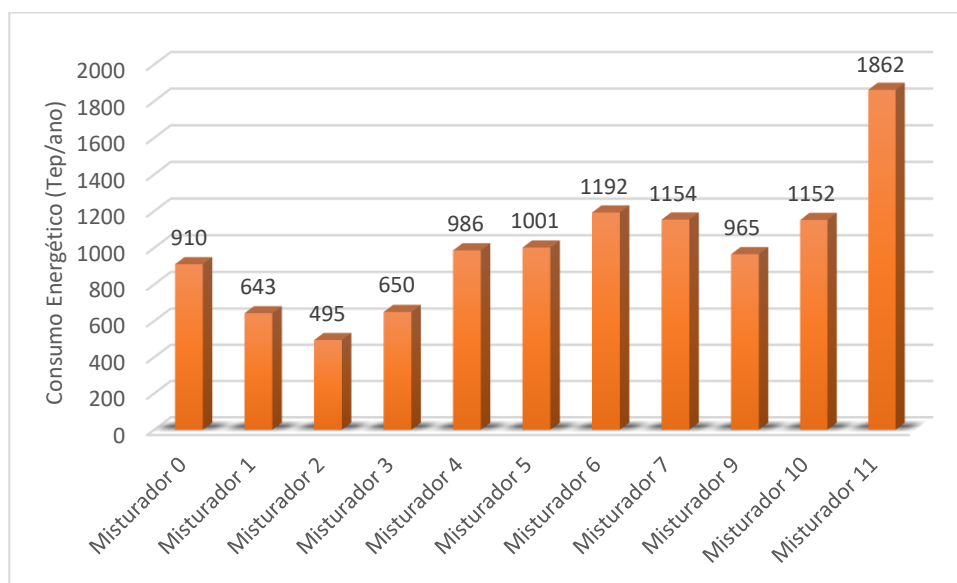


Figura 4.6 Representação dos consumos de energia elétrica dos misturadores, no ano de 2016.

Analisando a Figura 4.6 verifica-se que o consumo elétrico por parte dos misturadores não é uniforme, devendo-se ao facto de cada misturador possuir receitas de fabrico distintas. Assim as condições de operação são diferentes nos respetivos componentes do misturador, como é o caso das velocidades de rotação dos diversos elementos, como também as diferentes capacidades de processamento destes. Variando a velocidade de rotação destes componentes, que é alcançada através de motores elétricos, resulta numa variação da energia elétrica que será necessária alimentar aos motores para originar essa velocidade, resultando assim em consumos diferentes.

Para além disso, a produção total em termos de compostos por parte dos misturadores também difere, o que provoca esta variação verificada nos consumos de energia. Na Figura 4.7 encontra-se representado os valores de produção/processamento alcançada no ano de 2016 para cada misturador.

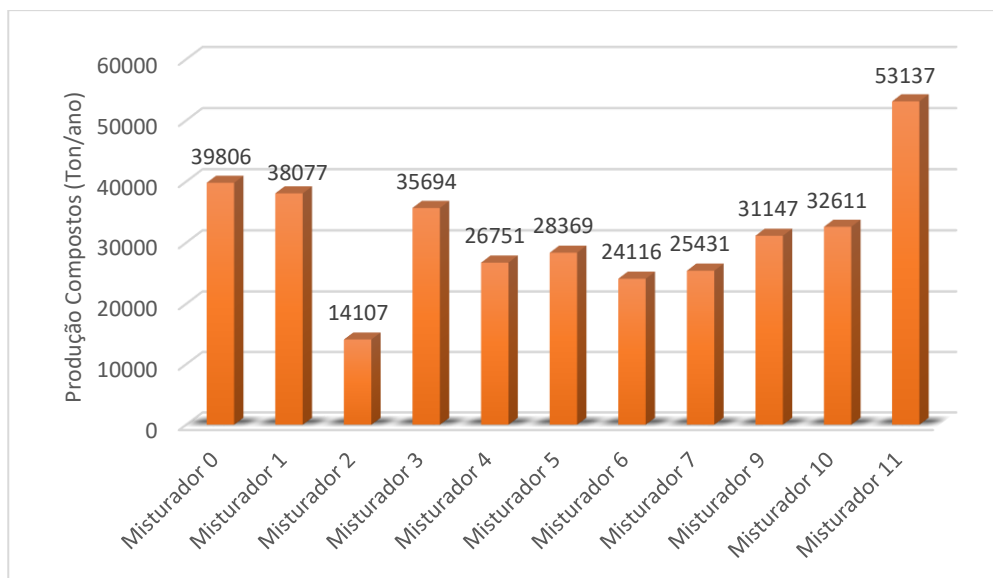


Figura 4.7 Representação da produção/processamento de compostos alcançada dos misturadores, no ano de 2016.

Através dos dados apresentados na Figura 4.6 e Figura 4.7, tornou-se possível determinar o consumo específico dos misturadores, de forma a realizar uma análise mais criteriosa dos dados recolhidos. Na Figura 4.8 encontram-se representados os consumos específicos obtidos.

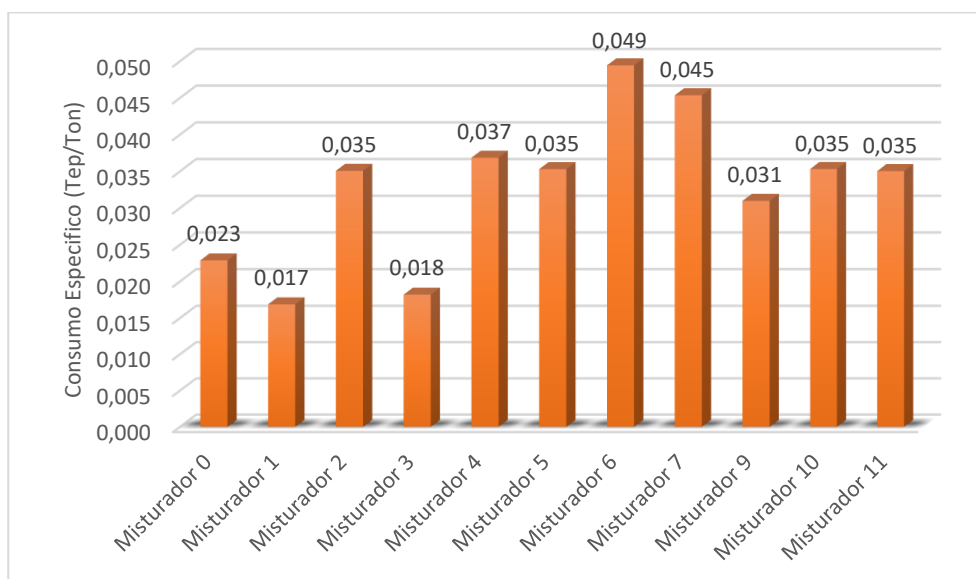


Figura 4.8 Representação do consumo específico dos misturadores, no ano de 2016.

Através da análise da Figura 4.8, pode-se verificar que os misturadores 6 e 7 são os que apresentam um consumo específico superior. Este facto está associado ao tipo de receitas de fabrico que são produzidas nestes misturadores, visto tratarem-se de misturadores master

a produzir compostos com sílica. Devido às maiores exigências resultantes do ciclo de mistura, como também os tempos de ciclo maiores, estes fatores resultam em consumos específicos superiores aos restantes misturadores.

Apesar dos consumos obtidos serem referentes a todos os componentes que constituem o misturador, foi realizada uma avaliação do peso de cada componente nesse consumo, tanto para os misturadores com configuração master (Misturador 2,4,5,6 e 7) (Figura 4.9) como para os que produzem compostos finais (Misturador 0,1,3) (Figura 4.10).

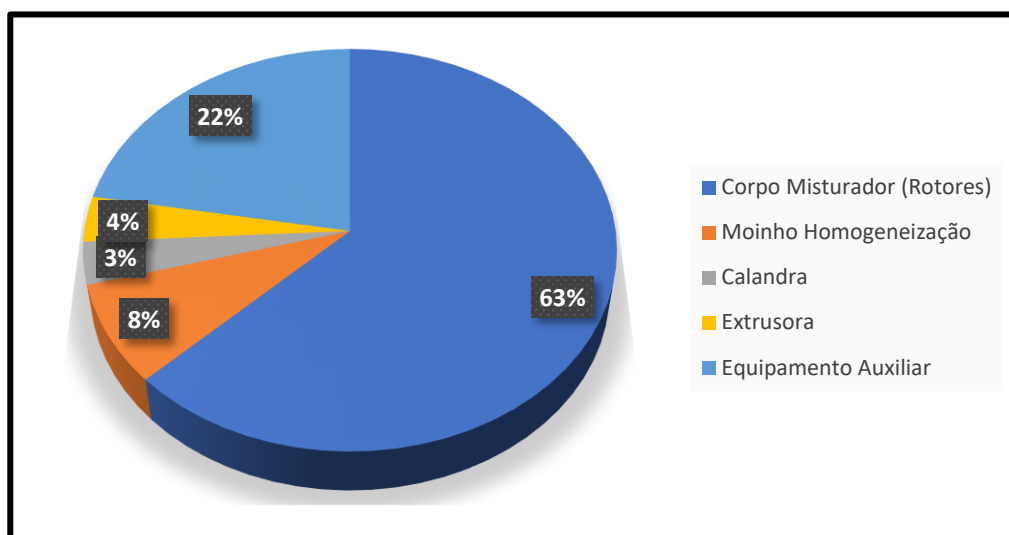


Figura 4.9 Representação do peso médio (%) de cada componente, no consumo de energia total dos misturadores master.

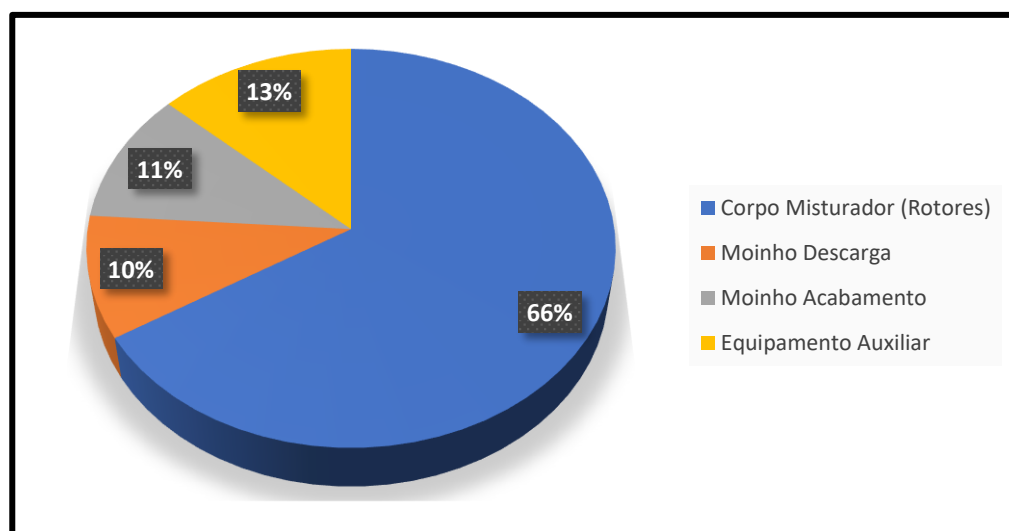


Figura 4.10 Representação do peso médio (%) de cada componente, no consumo de energia total dos misturadores finais.

Em termos de consumos elétricos globais, o conjunto dos misturadores ascendeu a 51,2 milhões de kWh por ano, o que se traduziu num gasto anual na ordem dos 4 milhões de euros. Tendo em conta que o consumo anual de energia elétrica da fábrica foi de aproximadamente 154 milhões de kWh (Tabela A.1), então o setor de misturação, englobando apenas os gastos dos misturadores, representa uma parcela de 33%, sendo o setor que possui a maior contribuição.

4.3 Consumos energéticos do sistema de transporte de negro de fumo

Relativamente ao transporte de negro de fumo, como mencionado anteriormente no subcapítulo 3.2.3, o ar usado para realizar o transporte é produzido através de um conjunto de cinco compressores, utilizados unicamente para este fim. Com o intuito de avaliar o desempenho da central de negro de fumo, foram recolhidos dados relativos aos consumos energéticos de todos os compressores, como também a produção de ar comprimido relativa ao ano de 2016. Assim foi realizado o estudo do consumo específico da central para ser possível identificar possíveis medidas de otimização.

Nesse sentido, na Figura 4.11 e Figura 4.12 encontram-se representados os valores de produção e consumo anual dos diferentes compressores que constituem a central, encontrando-se os valores mensais na Tabela A.5 e Tabela A.6 presentes no Anexo A.

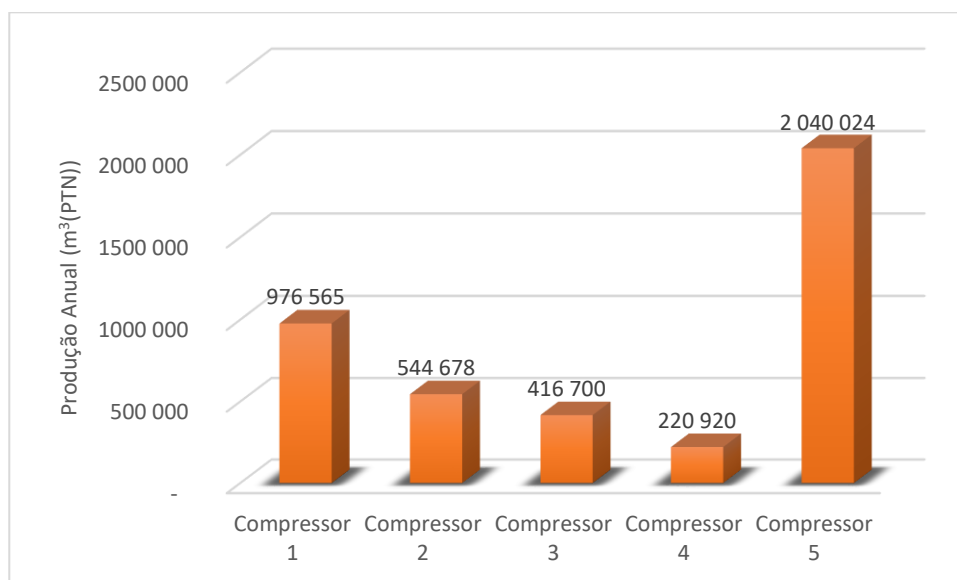


Figura 4.11 Representação da produção anual de ar comprimido, relativa aos compressores da central de negro de fumo.

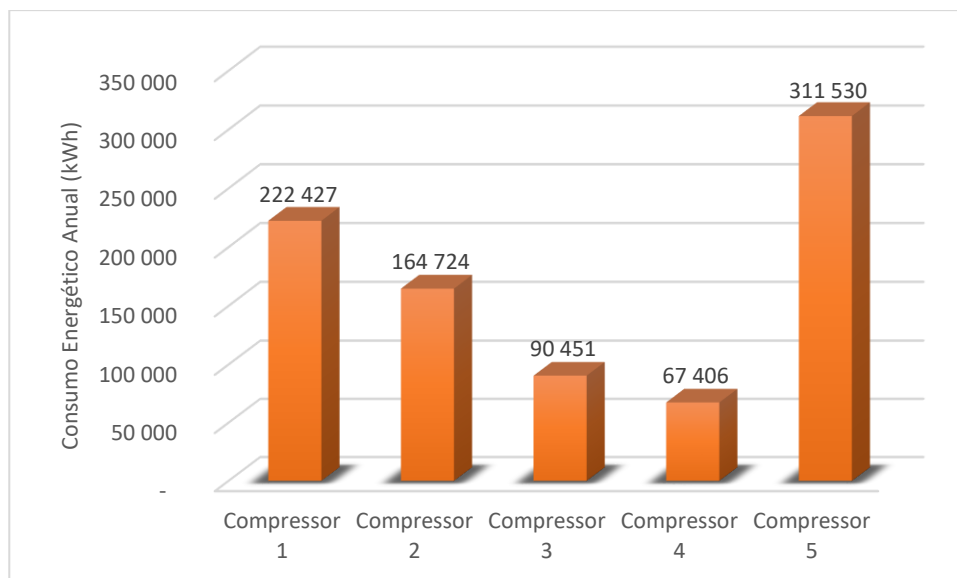


Figura 4.12 Representação do consumo energético anual, relativo aos compressores da central de negro de fumo.

Através da análise da Figura 4.11 e Figura 4.12, pode-se constatar que em termos de utilização, o compressor 5 é o que se encontra configurado como principal, ou seja, quando necessário é o primeiro a ligar, e como tal apresenta o consumo elétrico e produção de ar maior.

Para avaliar melhor os compressores, foi calculado o consumo específico anual destes, encontrando-se representado na Figura 4.13.

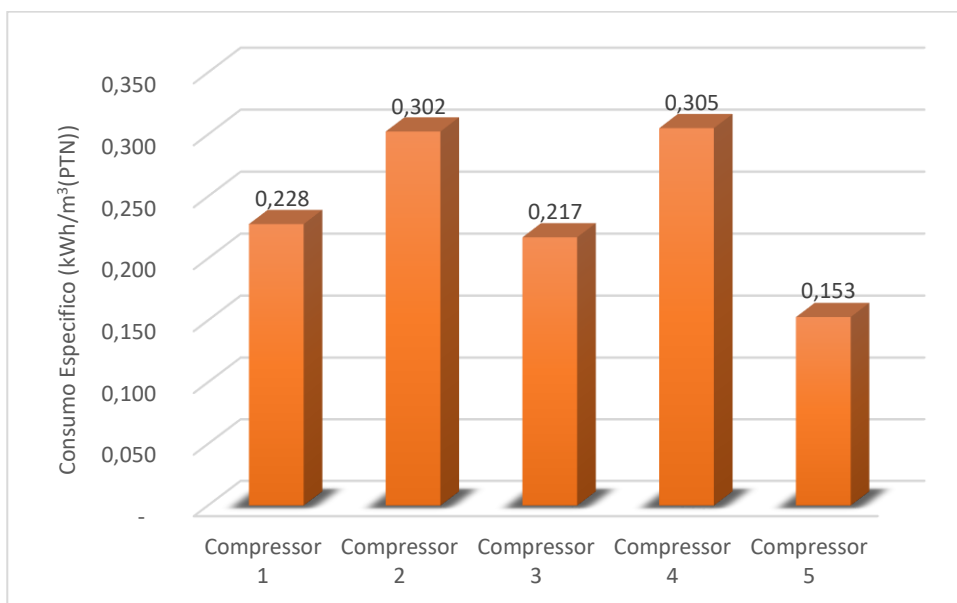


Figura 4.13 Representação do consumo específico anual, relativo aos compressores da central de negro de fumo.

Pode-se então constatar que, o compressor 5 é o que apresenta o consumo específico mais baixo, devido ao facto de possuir a maior produção de ar comprimido. Relativamente aos restantes, visto estes não serem utilizados com tanta frequência, o número de arranques é maior por parte dos compressores, originando assim consumos específicos maiores. Na globalidade, a central apresentou um consumo específico conjunto de 0,204 kWh/m³(PTN) (Tabela A.7 do Anexo A) no ano de 2016, e uma vez que o valor “ideal” para a pressão a que estes funcionam ser de 0,11 kWh/m³(PTN) (considerando os valores de potência e produção total dos compressores presentes na Tabela 3.1, para uma eficiência dos motores dos compressores de 90%), existe margem para melhorias neste sector.

Em termos práticos, a central de negro de fumo encontra-se dimensionada para que cada compressor seja capaz de produzir o ar comprimido necessário a um sistema de transporte. Uma vez que existem 4 sistemas de transporte nesta secção (2 desde os camiões cisterna até aos silos mensais, e outros 2 desde os silos mensais até aos silos diários como explicado no subcapítulo 3.2.2), na eventualidade de estarem a ocorrer os 4 transportes em simultâneo, isso irá exigir que 4 dos 5 compressores sejam utilizados. O quinto compressor deverá ter a função de reserva. Apesar disto, o desempenho dos compressores, ou seja, a capacidade de produzir mais ar comprimido com o menor consumo energético possível encontra-se diretamente ligado aos parâmetros de controlo estabelecidos em cada um deles (patamares de pressão de operação e tempo máximo de vazio). Também a quantidade de negro de fumo que é necessário transportar irá ter influência no seu consumo. Quanto maior for esta quantidade, maior será o ar comprimido necessário e consequentemente os compressores irão permanecer mais tempo ligados, melhorando assim o seu desempenho. Como tal foi realizado o levantamento dos parâmetros de controlo implementados nos compressores existentes, encontrando-se estes na Tabela 4.1.

Através da análise dos parâmetros de controlo presentes na Tabela 4.1, pode-se verificar que estes encontram-se muito próximos uns dos outros, o que em certas situações pode originar o acionamento de um compressor, sem que tal seja necessário. Outro parâmetro a ter em conta é o tempo de vazio do compressor 1, o que sendo excessivamente alto pode levar a consumos da central maiores. Como tal, a elaboração de um plano de controlo, que preveja todas as situações de consumo, poderá reduzir os consumos energéticos desnecessários, melhorando o consumo específico da central.

Tabela 4.1 Parâmetros de controlo utilizados nos compressores da central de negro de fumo.

Designação	Pressão Máxima (barg)	Pressão Mínima (barg)	Tempo Vazio (s)	Ordem de ativação
Compressor 1	6,6	5,6	900	2
Compressor 2	6,7	5,7	45*	1/2
Compressor 3	6,0	5,0	45*	4
Compressor 4	6,4	5,4	45*	3
Compressor 5	6,7	5,7	45*	1

*45 s de tempo de vazio apenas após um período de funcionamento mínimo de 450 segundos (Segurança do motor).

Relativamente ao transporte de negro de fumo, a quantidade de ar comprimido usado não é constante ao longo de um determinado transporte. Apesar disso, os sistemas de controlo que se encontram implementados possuem valores de referência em relação ao caudal de ar a usar. Em termos do ar alimentado aos sistemas de transporte instalados, o sistema de controlo estabelece como referência um caudal de 350 m³(PTN)/h para a tubagem principal de transporte, e um caudal de 300 m³(PTN)/h para a tubagem auxiliar bypass, podendo estes caudais variar no decorrer de um transporte consoante a pressão existente em cada uma destas tubagens, e a pressão do ar comprimido alimentado ao sistema de controlo.

No fim de cada transporte é realizada a limpeza de toda a linha, sendo para tal admitido o caudal de 1 200 m³(PTN)/h na tubagem de transporte, e 550 m³(PTN)/h na tubagem bypass durante um curto período de tempo (90 segundos), para garantir que não permaneça nenhum negro de fumo na respetiva tubagem de transporte.

5 Medidas de otimização

No seguimento dos levantamentos energéticos realizados, neste capítulo são selecionadas e explicadas as respetivas medidas de otimização a adotar/adotadas pela empresa no setor em estudo, como também são apresentadas as respetivas vantagens e poupanças obtidas com essa mesma implementação.

5.1 Estudo e otimização da central de negro de fumo

Como explicado no subcapítulo 3.2.3, uma das secções estudadas foi a unidade de compressores usados para a produção do ar comprimido utilizado no transporte do negro de fumo. No subcapítulo 4.3 foi possível chegar à conclusão que esta central não se encontrava com os consumos energéticos dentro dos parâmetros desejados, tendo tido um consumo específico médio no decorrer do ano de 2016 de 0,204 kWh/m³(PTN). De acordo com este consumo, e realizada a avaliação dos parâmetros de controlo implementados nos respetivos compressores, foi possível perceber o porquê da baixa eficiência da central. Uma das causas é o facto dos parâmetros adotados não corresponderem às necessidades exigidas, originando o acionamento de compressores sem que o consumo de ar o exija. Outro fator é a permanência dos compressores em estado de espera (vazio) por períodos prolongados, resultando em consumos energéticos desnecessários, como demonstrado na Tabela 4.1.

Nesse sentido, foi necessário realizar uma avaliação da central, com o intuito de identificar as fugas presentes na instalação, como também definir um novo plano de controlo para os compressores, de forma a ir de encontro com as exigências do processo.

5.1.1 Fugas da central de negro de fumo

Relativamente à quantificação das fugas de ar comprimido existentes nesta central, inicialmente foram realizados dois ensaios, em que se mediu a variação de pressão nos 2 reservatórios ao longo do tempo, num período em que não existia qualquer consumo de ar comprimido por parte dos utilizadores, neste caso, nos sistemas de transporte de negro de fumo. Na Figura 5.1 encontra-se representada essa variação, com os respetivos tempos limite identificados.

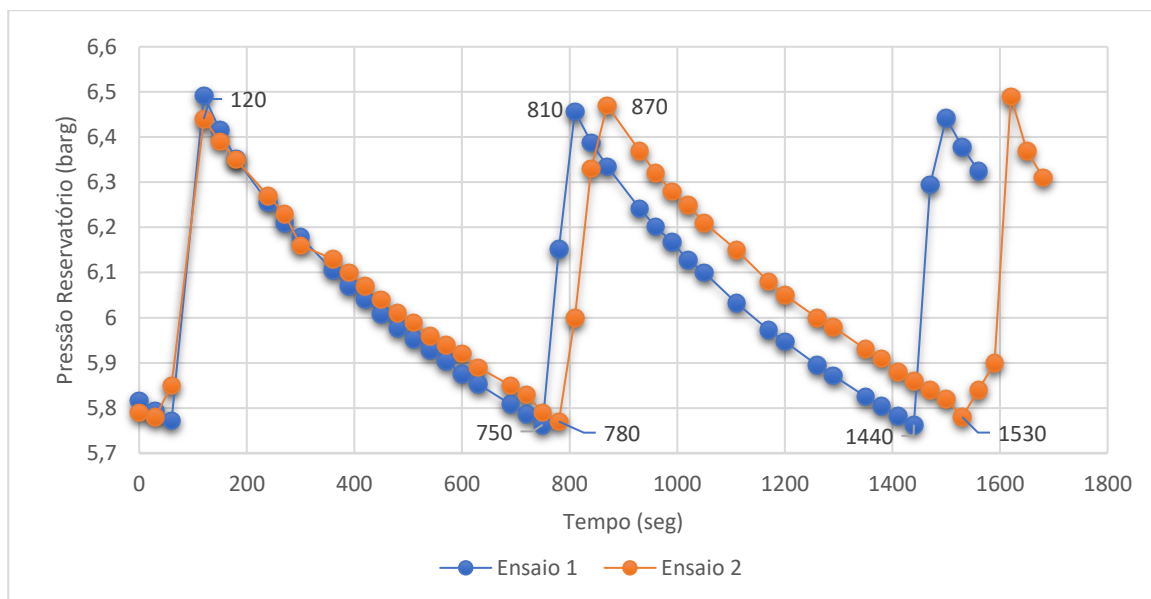


Figura 5.1 Dados recolhidos dos ensaios realizados para a quantificação das fugas de ar comprimido na central de negro de fumo.

Através de um balanço de massa a um ciclo de compressão (Método da capacidade do compressor (Novais, 1995)), com os dados recolhidos na Figura 5.1, e considerando a capacidade de compressão do compressor principal (NF5) de $768 \text{ m}^3(\text{PTN})/\text{h}$, foi possível obter os resultados presentes na Tabela 5.1. Relativamente ao tempo que o compressor passa em carga para que a pressão volte ao valor de pressão máxima, este foi obtido através de leitura real na sala dos compressores, devido ao erro associado às medições de intervalos de tempo pequenos através do software de registo de dados utilizado (Messdas), tendo sido recolhido o tempo aproximado de 30 segundos. Todos os dados referente à Figura 5.1 e cálculos realizados podem ser consultados no Anexo B.1.

Tabela 5.1 Resultados obtidos para a determinação das fugas de ar comprimido existentes na central de negro de fumo, através do método da capacidade do compressor.

Ensaio	$t_{\text{Carga}} \text{ (s)}$	$t_{\text{Vazio e Desligado}} \text{ (s)}$	$t_{\text{Ciclo}} \text{ (s)}$	$Q_{\text{Fugas}} \text{ (m}^3 \text{ (PTN)/h)}$
1	30	630	660	34,90
2	30	660	690	33,38
Médio	30	645	675	34,14

De forma a validar esta informação, foi realizado o levantamento do volume da rede da central, no que diz respeito aos reservatórios já mencionados anteriormente (10 m³ de capacidade total) e à tubagem, de forma a determinar o caudal de fugas pelo método do volume da instalação em período de vazio/desligado (Novais, 1995). O valor obtido para o volume total da rede de ar comprimido da central foi de 10,26 m³ aproximadamente. Através deste dado, e do valor médio da variação do tempo obtido para o ensaio 1 e 2, ou seja, 645 segundos, foi possível determinar o caudal de fugas, tendo sido obtido o valor de 42,69 m³(PTN)/h. Verifica-se então que os valores obtidos pelos diferentes métodos encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza, validando assim os resultados obtidos. Para efeitos de determinações ou quantificações futuras, foi considerado o caudal de fugas médio obtido entre os dois métodos, ou seja, 38,41 m³(PTN)/h.

Tendo em conta que a produção de ar comprimido da central correspondeu a 4 198 887 m³(PTN)/ano, então o caudal de fugas determinado representa apenas 8% da quantidade total de ar comprimido produzido por esta, e equivale a apenas 5% da capacidade de um dos compressores, valor este que é aceitável (Novais, 1995). No que diz respeito a fugas de uma instalação, este consumo em fugas representa um gasto anual em energia elétrica na ordem dos 69 000 kWh/ano, o que se traduz num custo aproximado de 5 500 €/ano (tendo em conta o consumo específico médio da central no ano de 2016). Na realização do levantamento do volume da rede foram detetadas algumas fugas pontuais que poderão ser corrigidas, o que poderá diminuir este custo. Uma vez que é impossível eliminar todas as fugas existentes, uma redução entre 10 e 50% será considerada com a correção das fugas mais notórias. Na Tabela 5.2 pode ser consultado um quadro resumo dos consumos e possíveis reduções obtidas com a correção das fugas da central de negro de fumo.

Tabela 5.2 Quadro resumo da redução do caudal de fugas na central de negro de fumo.

Designação	Situação Atual	Correção das Fugas (10/50 %)
Caudal de Fugas (m³(PTN)/h)	38,41	34,57 / 19,21
Fugas Anuais (m³(PTN))	336 508	302 857 / 168 254
Energia Consumida (kWh)	68 648	61 783 / 34 324
Redução Energética (kWh)	6 865 / 34 324	
Poupança (€/ano)	549 / 2 746	

5.1.2 Criação e implementação de um novo plano de controlo

No seguimento da análise realizada no subcapítulo 4.3, tornou-se necessário elaborar um plano de controlo para os compressores da central de negro de fumo, com o intuito de melhorar o consumo específico destes. Nesse sentido, foram estudados quatro cenários de consumo possíveis, tendo em conta o caudal médio de ar comprimido usado por um sistema de transporte.

Uma vez que um sistema de transporte consome em média $650 \text{ m}^3(\text{PTN})/\text{h}$, mais as fugas presentes na instalação, $38,4 \text{ m}^3(\text{PTN})/\text{h}$, e que cada compressor da central possui uma capacidade média de $770 \text{ m}^3(\text{PTN})/\text{h}$, isto significa que um compressor terá capacidade para produzir o ar comprimido necessário ao funcionamento de um sistema de transporte. Nesse sentido, o plano a elaborar irá enquadrar quatro cenários diferentes, no primeiro apenas se encontrará a funcionar um sistema de transporte, no segundo cenário estarão a funcionar dois sistemas de transporte em simultâneo, até ao quarto cenário em que todos os sistemas (4) estarão em funcionamento em simultâneo. Com estes cenários em perspetiva, o objetivo da elaboração de um novo plano passa por assegurar um fornecimento de ar comprimido contínuo em todos os casos estudados, sem que a pressão na rede baixe da pressão mínima necessária ao sistema de transporte, ou seja, 4,5 barg. Ao mesmo tempo é preciso garantir que os compressores quando acionados, apenas permanecem em período de vazio o tempo necessário para que caso o respetivo transporte ainda se encontre a ocorrer, a pressão na rede baixe até ao valor mínimo novamente, voltando este a entrar em carga.

Sendo assim, o novo plano elaborado parte de uma pressão mínima na rede de 4,6 barg, aumentando de cenário em cenário num intervalo de 0,4 barg até uma pressão de 5,8 barg, correspondendo estas pressões às pressões de acionamento de cada compressor. Para a determinação das pressões máximas de cada compressor, pressão na qual este passa a funcionar em vazio, foi considerado que o tempo de vazio máximo a definir no compressor será de 45 segundos. Realizando os cálculos, que podem ser consultados no Anexo B.1, obteve-se os intervalos de pressão presentes na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Dados obtidos para os parâmetros de controlo dos compressores da central de negro de fumo.

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Q Compressores (m ³ (PTN)/h)	768	1534	2300	3063
Q Consumido (m ³ (PTN)/h)	688,4	1338,4	1988,4	2638,4
P Máxima (barg)	6,7(6,8)	6,1(6,2)	5,6(5,7)	5,0(5,1)
P Mínima (barg)	5,8	5,4	5,0	4,6
t Vazio Máximo (s)	45,0	45,0	45,0	45,0
t Até Pressão Máxima (s)	433,8	149,2	76,8	44,1
Variação Pressão (bar)	1,0	0,8	0,7	0,5

No cenário 1, apenas um compressor será ligado, constituindo este o compressor principal da central. Neste cenário, o compressor ao medir a pressão existente na rede irá ligar quando essa pressão corresponder a 5,8 barg, e irá produzir ar comprimido até que essa pressão atinja o valor de 6,8 barg (a diferença de 0,1 bar foi considerada devido à queda de pressão verificada aquando da passagem de funcionamento em carga para vazio dos compressores). A partir deste ponto, o compressor irá permanecer em vazio numa duração máxima de 45 segundos, no caso da pressão da rede não atingir o valor mínimo estabelecido, mas no caso em estudo, uma vez que estará a ocorrer um sistema de transporte e como tal, existirá consumo de ar comprimido, então o compressor não irá atingir esse período máximo de tempo de vazio, voltando a entrar em carga em vez de desligar.

No cenário 2, parte-se do princípio que já existirá um compressor a funcionar, o descrito no cenário 1, mas uma vez que se encontram em funcionamento dois sistemas de transporte, existe a necessidade de um segundo compressor ligar. Nesse sentido, o segundo compressor irá ligar a uma pressão mínima na rede de 5,4 barg, comprimindo até que a pressão na rede atinja o valor de 6,2 barg, permanecendo em vazio um tempo máximo de 45 segundo, mas voltando a funcionamento em carga antes desse tempo no caso de se encontrar a ocorrer os dois transportes.

Nos cenários seguintes, a analogia de funcionamento é a mesma, sendo que no cenário 3, encontram-se os dois compressores dos cenários anteriores em funcionamento, mas uma vez que se encontram em funcionamento três transportes, existe a necessidade de ligar um terceiro compressor, e no cenário quatro o mesmo raciocínio, permanecendo quatro compressores em funcionamento, com os parâmetros de controlo estabelecidos na Tabela 5.3 e resumidos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Resumo dos parâmetros de controlo obtidos para os diferentes compressores da central de negro de fumo.

Designação	Pressão Máxima (barg)	Pressão Mínima (barg)	Tempo Vazio (s)	Ordem de ativação
Compressor 1	6,2	5,4	45*	2
Compressor 2	5,7	5,0	45*	3
Compressor 3	-	-	-	Reserva
Compressor 4	5,1	4,6	45*	4
Compressor 5	6,8	5,8	45*	1

*45 segundos de tempo de vazio apenas após um período de funcionamento mínimo de 450 s (Segurança do motor).

Apesar de se ter obtido os parâmetros de controlo presentes na Tabela 5.4, no decorrer da sua implementação foram encontrados alguns entraves no que diz respeito aos limites destes parâmetros impostos em cada compressor, como também devido aos erros associados aos cálculos matemáticos, uma vez que o caudal de ar comprimido consumido por cada transporte não é constante e uniforme ao longo do tempo. Nesse sentido foi necessário realizar alguns ajustes, de forma a garantir a mesma eficiência na produção de ar comprimido, mas ultrapassando as limitações encontradas. Na Tabela 5.5 encontram-se representados os parâmetros de controlo implementados.

Tabela 5.5 Resumo dos parâmetros de controlo implementados para os diferentes compressores da central de negro de fumo.

Designação	Pressão Máxima (barg)	Pressão Mínima (barg)	Tempo Vazio (s)	Ordem de ativação
Compressor 1	6,2	5,4	45*	2
Compressor 2	6,0	5,0	70*	3
Compressor 3	5,5	4,0	45*	5
Compressor 4	6,0	4,6	45*	4
Compressor 5	6,7	5,7	45*	1

*45/70 segundos de tempo de vazio apenas após um período de funcionamento mínimo de 450 s (Segurança do motor).

Analisando a Tabela 5.5 verifica-se que para o compressor 5 e 1, os que são acionados no cenário 1 e 2 respetivamente, os parâmetros de controlo implementados são muito semelhantes aos calculados. Apenas no caso do compressor 5, em que foi variada a pressão máxima e mínima, mas manteve-se o mesmo diferencial o que não afeta o tempo de vazio definido. No caso do compressor 2, uma vez que não foi possível realizar o ajuste da pressão máxima para o valor desejado de 5,7 barg, então foi definido o valor mais próximo permitido, tendo no entanto sido ajustado o tempo de vazio máximo para 70 segundos (os cálculos do novo tempo de vazio podem ser consultados no Anexo B.1), de forma a garantir que o compressor não desliga na eventualidade de estar a ocorrer o respetivo transporte. Para o último compressor, o numero 4, correspondente ao cenário 4, verificou-se no decorrer do estudo realizado, que a probabilidade de ocorrência deste cenário é muito baixa (no período de duração do estágio, 5 meses, ocorreu apenas uma vez). Como tal, foi definido um intervalo de pressões de funcionamento mais amplo, de forma a suportar os restantes compressores em caso de picos de consumo excessivo, ou seja, em fase de limpeza do sistema de transporte, no qual o caudal médio de ar consumido é de 1750 m³ (PTN)/h no decorrer de 90 segundos para um único sistema de transporte. Para além disto, desta forma evita-se uma variação de pressão pequena nos parâmetros deste compressor, que poderia levar a que este

apenas estivesse em carga por curtos períodos de tempo, originando maior desgaste e consequentemente mais manutenção. No caso do compressor 3, apesar deste não ser necessário para suportar os consumos exigidos pela central, sendo que num cenário ideal este apenas deveria ser ligado em caso de avaria de outro compressor, na Tabela 5.5 pode-se verificar que este ficou com parâmetros definidos por uma questão de segurança, na eventualidade de algum compressor deixar de funcionar, e não ser possível realizar a reparação imediata deste, prevenindo assim possíveis problemas no transporte de negro de fumo.

Após a implementação dos novos parâmetros de controlo, foram recolhidos dados de consumo e produção da central no decorrer dos meses de Abril, Maio e Junho, de forma a determinar o novo consumo específico médio da central. Os dados recolhidos podem ser consultados no Anexo B.1. Na Tabela 5.6 encontra-se representado um resumo dos resultados finais obtidos, comparando com a situação obtida no decorrer do ano de 2016, e respetiva poupança resultante da implementação do plano de controlo.

Tabela 5.6 Resumo dos resultados obtidos através da implementação dos novos parâmetros de controlo nos compressores da central de negro de fumo.

Parâmetro	Plano Antigo	Plano Implementado
Produção Anual (m ³ (PTN))	4 198 887	
Consumo Especifico médio (kWh/m ³ (PTN))	0,204	0,136
Energia consumida (kWh)	856 573	571 210
Poupança Energia (kWh)	285 362	
Poupança Anual (€/ano)	22 829	

Analisando a Tabela 5.6 verifica-se que com a implementação do novo plano, a poupança anual estimada é de 22 829 €, tendo em conta a mesma quantidade de ar comprimido produzida, o que resultará numa redução de 33,3 % no consumo energético. Verifica-se

também que o consumo específico médio da central se encontra mais próximo do ideal ($0,11 \text{ kWh/m}^3$ (PTN)), não sendo no entanto possível atingir este valor devido às oscilações de consumo exigidas à instalação. Para além da redução do consumo energético, este plano de controlo irá impedir que os compressores liguem sem que tal seja necessário, diminuindo assim os custos de manutenção associados a estes.

5.2 Estudo da viabilidade energética/económica da substituição das válvulas de sopro usadas nos mecanismos de limpeza dos filtros de mangas.

No decorrer do estágio realizado, foi possível acompanhar um processo de substituição das válvulas usadas no mecanismo de limpeza dos filtros de mangas existentes nos silos e nos coletores de aspiração dos misturadores, como explicado nos subcapítulos 3.1.1 e 3.2.2. O objetivo passou por testar a implementação das novas válvulas e avaliar se os problemas existentes relativamente à colmatação das mangas, e consequente aumento de pressão no interior dos silos/coletores, seria resolvido. Desta forma os problemas de fugas e aspiração de negro de fumo seriam evitados, originando um aumento do tempo de vida útil dos filtros de mangas. Paralelamente a este estudo, foi levada a cabo uma análise em termos energéticos, de forma a avaliar o consumo de ar comprimido por parte destas válvulas para realizar a respetiva limpeza das mangas, com o objetivo final de avaliar a sua viabilidade relativamente aos períodos de retorno do investimento necessário realizar para essa substituição.

No que diz respeito às válvulas, as que são utilizadas atualmente em todos os mecanismos de limpeza dos filtros de mangas, são do tipo solenoide com diafragma (ou membrana) como representado na Figura 5.2. Cada silo possui cinco válvulas de 1" instaladas (Figura 5.3), e em cada coletor de aspiração existem 18 válvulas de 1"1/2.

Relativamente às novas válvulas em estudo, estas são da marca MAC, com uma tecnologia de funcionamento (Figura 5.4) diferente das de diafragma, tendo sido realizada a sua instalação num dos silos (Figura 5.5), de forma a testar a sua viabilidade. Segundo testes realizados pelos fornecedores noutras instalações, estas válvulas proporcionam uma força de impacto do ar que é direcionado para os filtros de mangas maior, originando assim uma limpeza mais eficaz.

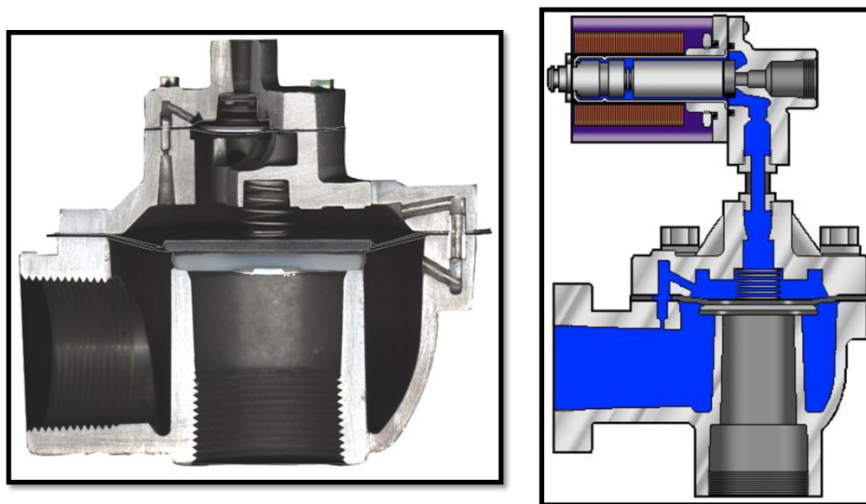


Figura 5.2 Representação das válvulas solenoides com diafragma utilizadas no mecanismo de limpeza dos filtros de mangas.



Figura 5.3 Visualização das válvulas solenoides instaladas nos silos de negro de fumo (imagem do lado esquerdo) e nos coletores de aspiração (imagem do lado direito).

Desta forma haverá uma diminuição da necessidade em realizar disparos de limpeza com tanta frequência, o que irá conduzir a consumos de ar comprimido mais baixos. Apesar destas vantagens terem sido reforçadas pelo fornecedor, e tendo em conta que existem problemas de limpeza com as válvulas existentes atualmente, o custo de aquisição das novas válvulas é um fator de peso a ter em conta. Cada uma de 1" (Silos) tem o custo de 450 € e as de 1"1/2 (Coletores de aspiração) de 550 €, ou seja, 2 250 € para as cinco válvulas necessárias a um silo, e 9 900 € para as 18 válvulas necessárias num coletor de aspiração.

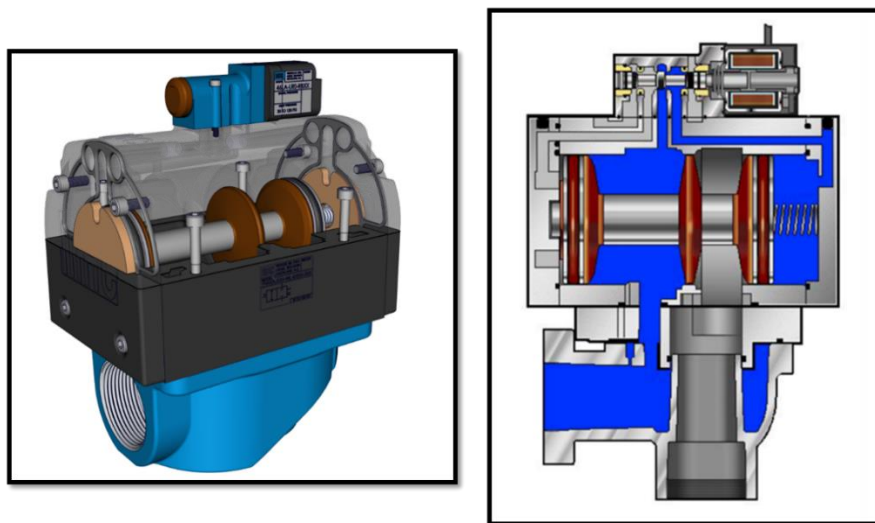


Figura 5.4 Mecanismo de funcionamento das novas válvulas “MAC Pulse Valve” (MAC, 2017).



Figura 5.5 Visualização das válvulas MAC instaladas nos silos de negro de fumo.

Com o intuito de determinar se o retorno do investimento realizado seria recuperado a curto/médio prazo, unicamente considerando a poupança obtida com a redução do consumo de ar comprimido, foi realizado um estudo desse consumo no mecanismo de limpeza para as válvulas usadas atualmente, e com as novas válvulas de teste instaladas.

5.2.1 Substituição das válvulas de limpeza nos silos diários de negro de fumo

Uma vez que a implementação das novas válvulas MAC foi realizada num dos silos diários de negro de fumo, e de forma a ser possível avaliar os seus consumos, foram levados a cabo ensaios para a sua quantificação, de forma a extrapolar os resultados para todos os silos, como também para os coletores de aspiração.

Relativamente ao mecanismo de limpeza, este tem como base de funcionamento um ciclo de disparos de ar comprimido distanciados por um intervalo de tempo definido, e como tal, foi necessário medir o tempo entre disparos usado atualmente nos silos, e o consumo de ar comprimido por disparo, de forma a ser possível extrapolar os dados recolhidos.

No local foi instalado um caudalímetro termomássico da marca Endress+Hauser, tendo sido realizados três ensaios para cada tipo de válvula, sendo estas de 1". Na Tabela 5.7 podem ser analisados os resultados principais obtidos, podendo no Anexo B.2 serem consultados os dados recolhidos referentes aos ensaios realizados.

Tabela 5.7 Resultados obtidos relativo aos ensaios realizados às válvulas de limpeza de 1" dos filtros de mangas.

Parâmetros	Válvula Diafragma	Válvula MAC
Intervalo entre disparos (s)	5	5
Quantidade Ar/Disparo (dm ³ (PTN))	95,8	82,3
Caudal Ar (m ³ (PTN)/h de funcionamento)	69,0	59,3
Redução Consumo Ar/Disparo (%)	14,1	

Realizada a avaliação dos consumos de ar comprimido por disparo de cada tipo de válvula, foi necessário quantificar o seu caudal de fugas. Para tal, foram levados a cabo ensaios semelhantes aos realizados anteriormente, mas em períodos em que não se encontrava a ocorrer qualquer transporte, ou seja, o sistema de limpeza não se encontrava em funcionamento. Na Tabela 5.8 encontram-se os resultados obtidos para cada uma das válvulas, podendo os respetivos levantamentos serem consultados no Anexo B.2.

Tabela 5.8 Resultados obtidos dos ensaios realizados para as fugas das válvulas de limpeza de 1" dos filtros de mangas.

Parâmetros	Válvula Diafragma	Válvulas MAC
Caudal Ar Comprimido (kg/h)	7,12	1,72
Caudal Ar Comprimido (m ³ (PTN)/h)	5,52	1,33
Redução Fugas (%)	75,9	

Obtidos todos os parâmetros relativos ao funcionamento de ambas as válvulas, tornou-se possível avaliar os períodos de retorno do investimento, para a implementação destas em todos os silos diários de negro de fumo existentes. No total, existem 17 silos em funcionamento, sendo então necessário um total de 85 válvulas, o que perfaz um investimento total de 38 250 €.

Uma vez que é impossível prever qual a melhoria em termos de aumento do intervalo entre disparos que é viável alcançar com as novas válvulas MAC, sendo apenas possível quantificar com a realização de testes, foi efetuada uma análise tendo em conta diferentes intervalos (5;10;15;30 e 60 segundos entre disparos de limpeza), de forma a analisar os possíveis períodos de retorno de investimento. Para além desta variável, foi necessário saber a quantidade de tempo que os sistemas de limpeza dos filtros se encontram em funcionamento por dia. Uma vez que estes sistemas apenas funcionam quando se encontra a ocorrer o respetivo transporte para o interior do silo, e que a sua duração depende da quantidade de negro necessário em cada misturador, foi essencial avaliar a quantidade de negro de fumo consumida em média por dia, e a capacidade de transporte de negro de fumo. Através de dados recolhidos na empresa, foi possível concluir que em média cada linha de transporte se encontra em funcionamento 12 horas por dia, e existindo duas linhas nesta secção da fábrica, resulta um período de funcionamento dos mecanismos de limpeza dos filtros de mangas dos silos de 24 horas (1,4 horas/dia em cada silo).

Obtidas todas as informações necessárias, foi então possível estimar os períodos de retorno do investimento para a substituição destas válvulas. Na Tabela 5.9 encontram-se representados os resultados obtidos para os diferentes tempos entre disparos, com a implementação das novas válvulas MAC. No Anexo B.2 podem ser consultados os exemplos de cálculo, para as determinações realizadas.

Tabela 5.9 Resultados obtidos relativamente à análise realizada para a substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas presentes nos silos diários.

Intervalo de Tempo entre Disparos (s)	Poupança Anual (€/ano)	Período de retorno (anos)
5	5 875,8 €	6,51
10	8 067,2 €	4,74
15	8 797,7 €	4,35
30	9 528,1 €	4,01
60	9 893,4 €	3,87

Analisando a Tabela 5.9 pode-se constatar que os períodos de retorno do investimento possíveis alcançar encontram-se compreendidos entre os 6,51 e os 3,87 anos, sendo apenas praticável alcançar estes valores devido às fugas existentes nas válvulas. De realçar que a poupança associada às fugas na substituição das válvulas de diafragma pelas MAC origina por si só uma poupança anual de 5159,2 €, o que resulta em poupanças em regime de funcionamento das válvulas relativamente baixas. Caso não existissem problemas de limpeza das mangas com as válvulas de diafragma existentes, a simples reparação/substituição destas válvulas por umas idênticas levaria à diminuição das fugas, resultando apenas num investimento de 30 € por kit de reparação. Ou seja, no total para as 85 válvulas existentes um investimento de 2 550 €, ou caso fosse realizada a substituição total destas um investimento total de 7 820 €. Esta medida, tendo em conta apenas a redução das fugas existentes, levaria a um retorno do investimento em menos de ano e meio.

Porem, as questões apontadas não se prendem unicamente com o consumo de ar comprimido, mas também com a eficiência na limpeza dos filtros de mangas e as avarias existentes nas válvulas de diafragma presentes atualmente nos silos. Com a aplicação das novas válvulas irá ser reduzido não só os consumos de ar mas também os custos de manutenção associados às mesmas. Todavia, uma análise dessa eficiência de limpeza e redução de manutenção deverá ser realizada, de forma a avaliar corretamente a situação.

Após ter sido efetuado o estudo, foi possível realizar o aumento do intervalo de tempo entre disparos de limpeza no silo com as novas válvulas MAC, tendo esse tempo sido aumentado de 5 segundos para 15 segundos. Após 2 semanas de testes com este novo intervalo de tempo foi possível constatar que apesar do mecanismo de segurança do silo não ter disparado devido à sobrepressão, no software de visualização o pressostato indicou a presença de pressões elevadas no interior do silo (sempre abaixo do limite). Não sendo esta situação ideal, constatou-se que este intervalo entre disparos constitui o tempo limite que se pode alcançar nesta aplicação específica. Isto prende-se ao facto da quantidade de sólidos que fica retida nos filtros por quantidade de ar filtrada ser elevada, devido ao transporte pneumático, o que exige uma frequência de sopros de limpeza mais constantes.

Posto isto, o período de retorno do investimento para a substituição das válvulas nos silos diários será de 4,35 anos, com uma poupança anual de 8 797,7 €, tendo sido concluído que o intervalo de tempo entre disparos que foi possível alcançar foi de 15 segundos.

5.2.2 Substituição das válvulas de limpeza nos coletores de aspiração dos misturadores

Analisada a substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas nos silos diários de negro de fumo, foi então possível realizar a mesma avaliação para os coletores de aspiração. Neste caso, os coletores encontram-se a funcionar 24 horas por dia, realizando disparos de limpeza entre 2 a 5 segundos, dependendo de coletor para coletor. Para efeitos de quantificação foi considerado um tempo médio entre disparos de limpeza de 4 segundos. Outro dado necessário analisar foi a quantidade de ar comprimido utilizado por disparo de limpeza, sendo que as válvulas utilizadas nos coletores são de maiores dimensões, 1"1/2, e como tal a quantidade de ar consumida por disparo é superior à obtida para os ensaios realizados nos silos diários. Foi então necessário estimar a quantidade de ar comprimido consumido por disparo para estas válvulas, tanto as de diafragma como as novas a implementar da marca MAC. Para tal, e através de dados recolhidos junto do fornecedor das válvulas MAC, foi obtida uma relação entre a quantidade de ar consumido por uma válvula de 1" relativamente a uma de 1"1/2 para uma pressão de alimentação do ar comprimido de 6 barg. Através dessa relação ($\text{Quantidade ar comprimido } 1"1/2 = 2,25 * \text{Quantidade ar comprimido } 1"$), e tendo em conta o consumo de ar comprimido por disparo de limpeza obtido nos ensaios realizados (Tabela 5.7) para as válvulas de 1", foi possível estimar o consumo

das válvulas existentes nos coletores, como também nas válvulas MAC. Na Tabela 5.10 podem ser consultados os resultados obtidos.

Tabela 5.10 Resultados obtidos relativo às válvulas de limpeza dos filtros de mangas de 1"1/2.

Parâmetros	Válvula Diafragma	Válvula MAC
Intervalo entre disparos (s)	4	4
Quantidade Ar/Disparo (dm ³ (PTN))	215,6	185,3
Caudal Ar (m ³ (PTN)/h de funcionamento)	194,0	166,8
Redução Consumo Ar/Disparo (%)	14,1	

Obtidos estes dados, e não tendo sido possível quantificar o caudal de fugas existentes nestas válvulas, foi realizada a análise apenas considerando o regime de funcionamento das mesmas.

Para a análise do período do retorno do investimento, foi então realizada uma avaliação para diferentes intervalos de tempo entre disparos (4;10;15;30 e 60 segundos entre disparos de limpeza), analogamente ao que foi realizado para os silos diários. Neste caso específico não foi possível quantificar a melhoria possível alcançar em termos de aumento do intervalo de tempo entre disparos, uma vez que não foram instaladas e testadas as novas válvulas. Apesar disso, neste tipo de aplicação, a quantidade de sólidos aspirada para dentro do coletor é bastante inferior à que se verifica nos silos de negro de fumo na duração do seu transporte, o que poderá resultar em melhorias mais significativas que as que foram alcançadas nesse caso em particular.

Na Tabela 5.11 encontram-se os resultados obtidos para a substituição das válvulas num dos coletores, como também para o total dos 9 coletores onde é necessária a substituição, podendo os cálculos serem consultados no Anexo B.2. Nos restantes dois coletores existentes na empresa, uma vez que estes são mais recentes e não apresentam problemas em termos de eficiência de limpeza e manutenção, então a urgência na substituição das válvulas de sopro não é tao elevado, e como tal, não foi considerado no estudo realizado.

Para os 9 coletores de aspiração, será necessário um total de 162 válvulas de 1"1/2, perfazendo um investimento total de 89 100 €.

Tabela 5.11 Resultados obtidos relativamente à análise realizada para a substituição das válvulas de limpeza num coletor de aspiração.

Intervalo de Tempo entre Disparos (s)	Poupança Anual/Coletor (€/ano)	Poupança Total (€/ano)	Período de retorno (anos)
4	2 015,5 €	18 139,4 €	4,91
10	9 411,5 €	84 703,4 €	1,05
15	11 055,0 €	99 495,4 €	0,90
30	12 698,6 €	114 287,4 €	0,78
60	13 520,4 €	121 683,4 €	0,73

Analisando a Tabela 5.11 verifica-se que com a substituição das válvulas de diafragma existentes atualmente pelas válvulas MAC, a poupança anual possível obter varia entre 121 683,4 € e 18 139,4 €, com um período de retorno do investimento entre 0,73 a 4,91 anos. Considerando que este tipo de coletores aspiram uma quantidade de partículas baixa, comparativamente aos silos de negro de fumo, e que para os silos se conseguiu alcançar um intervalo entre disparos de limpeza de 15 segundos, então no caso dos coletores o intervalo possível alcançar será superior a este, resultando num período de retorno do investimento menor que um ano, com poupanças anuais superiores a 100 000 €. De realçar que o estudo realizado para os coletores não leva em conta as fugas de ar comprimido existentes nas mesmas, nem custos associados com a manutenção das válvulas e filtros de mangas, o que poderá originar uma poupança anual efetivamente superior à determinada.

Tendo em conta os resultados obtidos, o mais indicado será realizar a substituição das válvulas num dos coletores que apresente mais problemas de aspiração. Nesse sentido, é importante realizar uma avaliação mais aprofundada durante um determinado período de tempo, de forma a ser possível quantificar a melhoria em termos de intervalo de tempo entre disparos, como também analisar o estado das mangas após a implementação das válvulas. Na eventualidade dos resultados obtidos no estudo realizado serem validados, então a

instalação nos restantes coletores será o mais adequado. Desta forma diminui-se não só os consumos energéticos da empresa, como também os problemas de colmatção das mangas, reduzindo os custos de manutenção.

5.3 Substituição das bombas de recirculação dos tanques de banho antiaderentes dos misturadores

Na análise realizada aos diferentes componentes que compõem um misturador, foi verificado que na secção do banho antiaderente existe um reservatório com agitador em que a solução antiaderente aplicada à borracha se encontra armazenada. Para além disso, essa solução encontra-se em contínua recirculação, passando do reservatório para o local de aplicação do banho, sendo posteriormente filtrada e recolhida novamente no reservatório, realizando assim um ciclo. Este processo é alcançado através do uso de bombas, que permitem a recirculação do fluido.

Foi verificado que as bombas usadas atualmente são do tipo de deslocamento positivo, mais concretamente de diafragma (ou membrana), e que o seu funcionamento depende da utilização de ar comprimido como meio de bombagem (Figura 5.6).

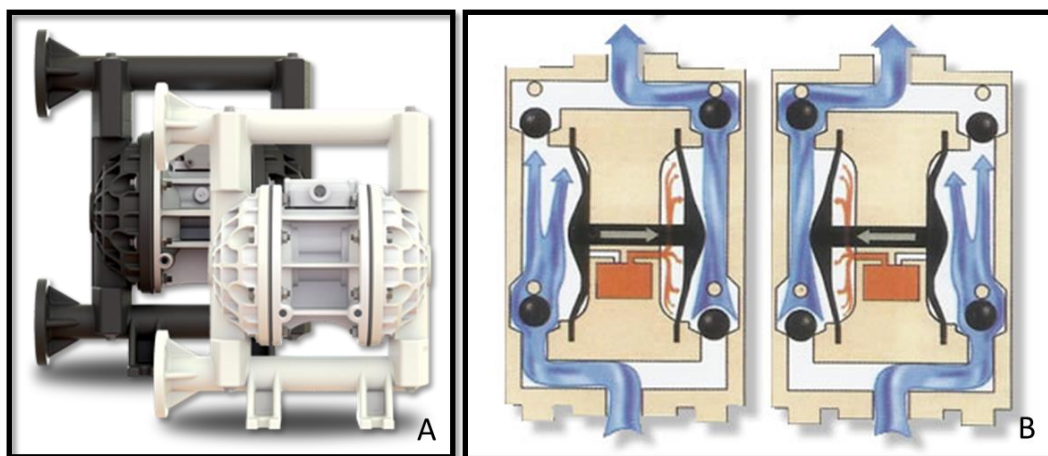


Figura 5.6 Representação de uma bomba de diafragma duplo (A) e respetivo mecanismo de funcionamento (B) (Adaptado de (Versa-Matic, 2017)).

Uma vez que, numa indústria o tipo de energia mais dispendiosa advém do ar comprimido, surgiu a ideia de estudar a hipótese de se realizar a substituição destas bombas, por umas elétricas mais eficientes e económicas, tanto a nível energético, como a nível de manutenção.

Devido às especificações do processo e do tipo de fluido a bombear, a bomba mais adequada deveria ser tal, que permitisse o menor contacto possível entre o fluido e as engrenagens da bomba. Desta forma diminuía-se a probabilidade de possíveis

contaminações da solução, e ao mesmo tempo prevenia-se o aumento de temperatura desta devido ao contacto direto com os materiais da bomba. Nesse sentido, foi ponderada inicialmente a hipótese da aplicação de uma bomba peristáltica, no sentido em que o fluido apenas circula no interior de uma tubagem, sendo bombeado através do mecanismo representado na Figura 5.7.

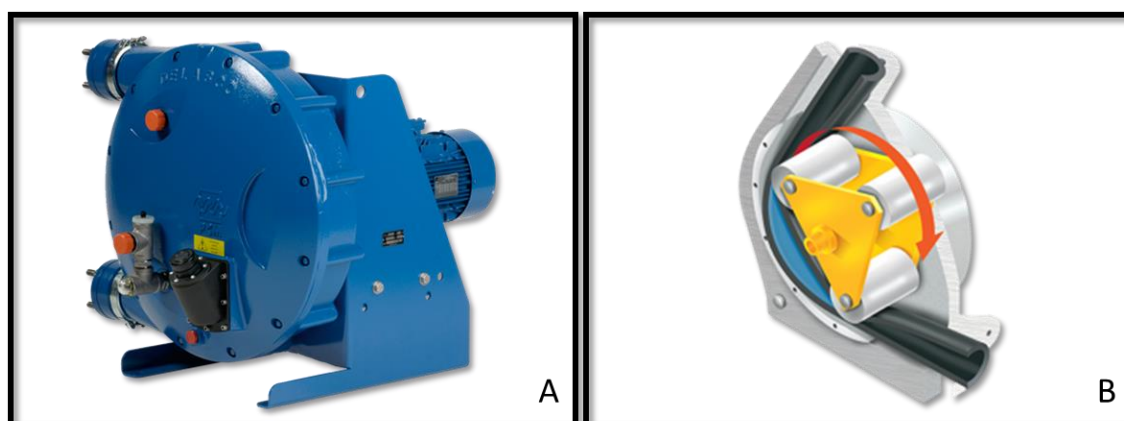


Figura 5.7 Representação de uma bomba peristáltica (A) e respetivo mecanismo de funcionamento (B) (Adaptado de (PCM, 2017)).

Após discussão da hipótese, foi verificado que a tentativa de implementação deste tipo de bombas já tinha sido realizada, porém questões relacionadas com a elevada exigência de manutenção devido a avarias, levou à descontinuação da utilização deste tipo de bombas nesta aplicação específica.

Nesse sentido, foi necessário estudar outras alternativas, tendo sido contactado um fornecedor de forma a averiguar o tipo de bomba mais adequado para a aplicação. Foi também verificado que bombas do tipo cavidade progressiva (parafuso) da marca PCM (Figura 5.8), já eram utilizadas para o transporte desta solução noutra secção do departamento, o que levantou a questão da possibilidade em instalar este tipo de bombas nos tanques de banho.

Relativamente às bombas usadas atualmente, foi necessário avaliar o seu regime de funcionamento de forma a ser possível dimensionar corretamente a nova bomba. As bombas de diafragma instaladas possuem uma capacidade máxima de 8,52 m³/h, existindo duas bombas por cada tanque de banho num misturador, uma em funcionamento contínuo e uma segunda de reserva. O ar comprimido alimentado às bombas é proveniente da rede da fábrica,

a uma pressão de 6 barg, sendo possível realizar a sua regulação à entrada das bombas de forma a ajustar o caudal de líquido a bombear.

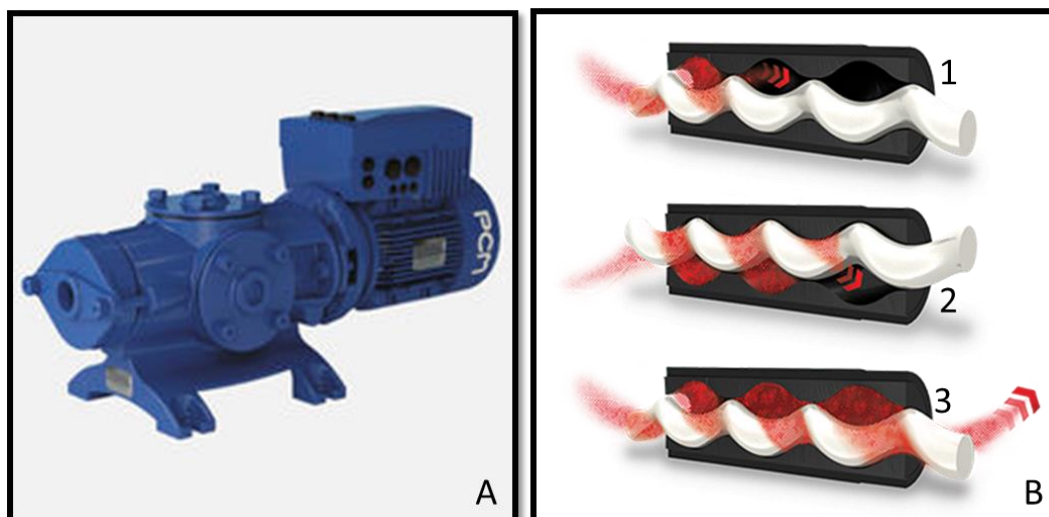


Figura 5.8 Representação de uma bomba de cavidade progressiva (A) e respetivo mecanismo de funcionamento (B) (Adaptado de (PCM, 2017)).

De forma a ser possível quantificar o custo anual associado ao funcionamento destas bombas, foram realizadas medições do consumo de ar comprimido em diferentes misturadores, para se obter um valor médio desse consumo, e ao mesmo tempo ser possível estimar o caudal de líquido que estas se encontram a bombear.

Através das medições realizadas com um caudalímetro termomássico da marca Endress+Hauser (Tabela B.14 do Anexo B.3), foi possível obter um consumo médio de ar comprimido de $26,04 \text{ m}^3 \text{ (PTN)/h}$, o que se traduz num caudal de fluido compreendido entre os $1,8$ e os $4 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura B.1 do Anexo B.3), dependendo da pressão de descarga do fluido, e da pressão do ar comprimido alimentado à bomba.

Obtidas estas informações, e através do contacto com o fornecedor da empresa Seco Centrifugação L^a, representante da marca PCM em Portugal, foi possível pedir cotação para uma bomba de cavidade progressiva que preenche-se os requisitos necessários. Durante a visita dos representantes da Seco Centrifugação à empresa, foi analisado o local de instalação e especificações necessárias, tendo sido possível negociar a aquisição de uma unidade de teste, para ser possível implementar e avaliar o correto dimensionamento da bomba necessária ao processo. A unidade de teste instalada, de referência PCM EcoMoineau 3M6F

(Figura 5.9), possui uma capacidade máxima de 3,5 m³/h, até uma pressão de descarga de 4 bar, tendo um motor de 0,55 kW de potência com variador de frequência integrado.



Figura 5.9 Visualização da bomba elétrica de teste da marca PCM.

Após 21 dias de testes com a bomba PCM, foi verificado o bom funcionamento da mesma, tendo-se analisado que a bomba a funcionar a 40% da capacidade máxima, possui um caudal suficiente para realizar a recirculação da solução antiaderente. Nesse sentido, e de forma a não adquirir uma bomba com uma capacidade muito superior ao necessário (devido à diminuição do rendimento do motor a funcionar a frequências mais baixas, e ao aumento da temperatura deste nestes regimes), foi solicitado ao fornecedor a cotação para a bomba PCM EcoMoineau 2M6F, com capacidade máxima de 2,36 m³/h e um motor com uma potência de 0,55 kW, com a opção de vir equipado com e sem variador de frequência. Na Tabela 5.12 encontram-se representados os resultados obtidos para a análise realizada a cada tipo de bomba, as de diafragma existentes atualmente e as novas da marca PCM. No Anexo B.3 podem ser consultadas as especificações técnicas da bomba, como também as respetivas cotações obtidas por parte dos fornecedores, com os exemplos de cálculo realizados para a obtenção de todos os resultados analisados neste subcapítulo.

Tabela 5.12 Resumo dos dados obtidos para a substituição da bomba de diafragma duplo pela bomba de cavidade progressiva.

Parâmetros	Bomba Duplo Diafragma	Bomba Cavidade Progressiva
Caudal Ar Comprimido (m ³ (PTN)/h)	26,04	-
Potência Elétrica (kW)	-	0,55
Consumo Energético (kWh/ano)	24 060,7	4 620,0
Custo Médio Anual (€/ano)	1 924,9	369,6
Poupança Anual/Bomba (€/ano)	1 555,3	
Redução dos custos (%)	80,8	

Obtida a poupança média resultante da substituição da bombas dos tanques de banho, foi possível determinar o período de retorno do investimento para as cotações obtidas por parte dos fornecedores, para a bomba PCM EcoMoineau 2M6F com e sem variador de frequência, apenas considerando o custo de aquisição das mesmas, sem contabilizar os gastos inerentes à sua instalação. Na Tabela 5.13 encontram-se representados esses resultados.

Tabela 5.13 Análise económica da substituição das bombas dos tanques de banho

Parâmetros	Bomba PCM 2M6F com VFD	Bomba PCM 2M6F sem VFD
Poupança média Anual/Bomba (€/ano)	1 555,3	
Investimento/Bomba (€)	1 542	992
Período de Retorno (Meses)	11,90	7,65

Uma vez que, em cada misturador existe uma bomba de diafragma em funcionamento, a substituição destas deverá ser realizada em todos eles e na strainer (12 unidades), perfazendo um investimento total de 18 504 € caso seja escolhida a bomba PCM com variador de frequência integrado, ou de 11 904 € para a bomba PCM sem variador. Em termos globais, esta medida irá resultar numa poupança média anual de 18 663,1 €.

Relativamente à manutenção exigida pelas bombas de diafragma e segundo dados recolhidos na empresa, estas tem tido um custo associado de 872 €/ano (bomba) (Tabela B.16 do Anexo B.3). Segundo o fornecedor das bombas PCM, estas por norma requerem manutenção anual na ordem dos 487 €/bomba (Tabela B.17 do Anexo B.3), reduzindo-se assim o custo de manutenção em 44,2%. Apesar destas informações, uma análise mais criteriosa e respetiva avaliação destes dados deve ser realizada, de forma a validar a sua veracidade, sendo apenas possível alcançar este resultado com a implementação de uma das novas bombas por um período de tempo mínimo de 1 ano.

5.4 Padronização dos consumos energéticos dos diversos equipamentos

Como mencionado no capítulo 4, na Continental Mabor existe um software de monitorização dos consumos energéticos, MESSDAS, que permite registar, recolher e analisar os respetivos consumos dos diversos equipamentos existentes na empresa. Como tal, é possível realizar a padronização desses consumos em regime de funcionamento, o que permitirá estabelecer um intervalo de valores “ótimos” em termos de consumo de energia para cada equipamento.

Nesse contexto, a realização dessa padronização e elaboração de um sistema de alertas, via sonoro nos respetivos equipamentos ou via mensagem de aviso, poderá auxiliar na deteção antecipada de problemas e avarias nos diversos equipamentos. Esta medida levará a tempos de resposta por parte das equipas de manutenção curativa e preventiva mais curtos e eficazes, resultando em custos associados a estas menores.

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

A presente dissertação teve como principal objetivo encontrar soluções de otimização energética, no setor principal do processo de fabrico dos componentes que constituem um pneu, a secção de mistura e respetivos sistemas auxiliares, como é o caso do transporte de uma das matérias-primas, o negro de fumo.

Com esse objetivo em vista foram estudadas 4 medidas de otimização no setor, a criação e implementação de um novo plano de controlo para os compressores responsáveis pela produção do ar comprimido necessário ao transporte do negro de fumo; o estudo da viabilidade energética/económica da substituição das válvulas de sopro usadas nos mecanismos de limpeza dos filtros de mangas existentes nos silos diários de negro de fumo e nos coletores de aspiração acoplados aos misturadores; a análise da substituição das bombas pneumáticas usadas na recirculação dos tanques de banho antiaderente por bombas elétricas de cavidade progressiva (parafuso); e por fim a criação de um sistema de padronização dos consumos energéticos existentes na empresa.

Com a elaboração e implementação do novo plano de controlo para os compressores, foi possível reduzir o consumo específico médio destes de $0,204 \text{ kWh/m}^3$ (PTN) para $0,136 \text{ kWh/m}^3$ (PTN), traduzindo-se numa poupança anual na ordem dos 23 000 €. Para além da poupança em termos energéticos/económicos, esta medida previne o acionamento de compressores sem que haja essa necessidade, diminuindo assim a manutenção requerida pelos mesmos.

No estudo da viabilidade energética/económica na substituição das válvulas de sopro utilizadas nos mecanismos de limpeza dos filtros de mangas, para o caso dos silos de negro de fumo, foi possível concluir que, para um investimento de 38 250 €, correspondente a 85 válvulas (17 Silos), a poupança anual estimada varia entre 5 876 €/ano e 9893 €/ano traduzindo-se num período de retorno compreendido entre 6,51 e 3,87 anos. Após testes realizados com as novas válvulas de sopro, o intervalo de tempo que foi possível alcançar entre disparos foi de 15 segundos, sem causar problemas no transporte de negro de fumo. Apesar dos valores obtidos, verificou-se que das poupanças obtidas, aproximadamente 5 200 €/ano correspondem a fugas existentes nestas válvulas, o que com a simples reparação das mesmas o problema seria resolvido. No entanto, as questões existentes não se prendem apenas com os consumos de ar comprimido, mas sim com os problemas de limpeza dos filtros de mangas existentes com as válvulas de diafragma utilizadas atualmente.

No caso da substituição das válvulas de sopro nos coletores de aspiração concluiu-se que para um investimento de 89 100 €, correspondente a 162 válvulas (9 Coletores), a poupança anual estimada varia entre 18 139 €/ano e 121 683 €/ano, traduzindo-se num período de retorno entre 4,91 e 0,73 anos, consoante o aumento do intervalo de tempo entre disparo de limpeza que será possível alcançar (4;10;15;30 e 60 segundos). Neste caso específico, apesar de não ter sido possível testar a implementação das novas válvulas e avaliar o intervalo de tempo entre disparos viável alcançar, foi possível concluir que esse intervalo será superior ao obtido para os silos de negro de fumo, visto a quantidade de sólidos filtrados por unidade de ar ser bastante inferior, resultando em poupanças anuais na ordem dos 100 000 €.

Para a substituição das bombas pneumáticas usadas na recirculação do banho antiaderente, concluiu-se que com a implementação da bomba de cavidade progressiva, a poupança anual resultante será de 18 663 €. O investimento necessário para as 12 bombas, correspondente aos 11 misturadores e strainer, será de 18 504 e 11 904 € no caso de a bomba possuir ou não variador de frequência incorporado. O período de retorno do investimento resultante será de 11,9 e 7,7 meses.

Por fim, foi sugerida a implementação de um sistema de padronização e alerta dos consumos energéticos dos diversos equipamentos existentes na empresa. Uma vez que existe um software de monitorização desses consumos, MESSDAS, a implementação deste tipo de sistema poderá auxiliar na deteção antecipada de possíveis problemas e avarias nas respetivas máquinas. Deste modo o tempo de resposta das equipas de manutenção curativa e preventiva melhoraria, impedindo assim problemas de maior dimensão e ao mesmo tempo reduziria os custos associados a estas.

Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se:

- Elaboração do sistema de padronização e alerta sugerido no decorrer da dissertação realizada.
- Análise e otimização da rede de produção e distribuição de ar comprimido da fábrica, em particular no que diz respeito ao controlo de fugas existentes.
- Estudo da implementação do aquecimento através de vapor nos reservatórios de óleo, visto já existir parte da instalação montada para esse fim. Nesse contexto, propõe-se o estudo e dimensionamento da rede de vapor que será necessária criar até aos reservatórios de óleo.

Bibliografia

- RubberMW. (2015). *TWIN SCREW ROLLER HEAD EXTRUDER*. Retrieved Março 21, 2017, from <https://rubbermachineryworld.com/tag/twin-screw-roller-head-extruder/>
- APA. (2017). Retrieved Março 3, 2017, from Agência Portuguesa do Ambiente: <https://www.apambiente.pt/index.php>
- Cofely. (n.d.). *Industrial Facility Management to Continental Mabor*. Retrieved Fevereiro 21, 2017, from <http://www.cofely-gdfsuez.pt/noticias/detalhes.php?id=11>
- Continental AG. (2008). Tyre Basics Passenger Car Tyres.
- Continental Mabor. (2016). Manual de Recomendações.
- Continental Pneus. (2017). Obtido em 10 de Fevereiro de 2017, de <http://www.continental-pneus.pt/ligeiros/empresa/sobre-n%C3%B3s/corporativo>
- Desenvolvimento Sustentável*. (2017, Março 3). Retrieved from http://arquivo.devmedia.com.br/artigos/Rafael_Julian/TIVerde/TIVerde01.jpg
- DGEG. (2008). Despacho 17313. Diário da República, 2ª Série.
- Enerdata. (2016). *Global Energy Statistical Yearbook 2016*. Retrieved Março 3, 2017, from <https://yearbook.enerdata.net/>
- Gomes, M. M. (s.d.). *Negro de Carbono*. (rubberpedia) Obtido em 1 de Março de 2017, de <http://www.rubberpedia.com/negro-carbono.php>
- HF Mixing Group. (2017). Retrieved Março 2017, 2, from <http://www.hf-mixinggroup.com/en/products/>
- Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (1992). *Fundamentos de transferência de calor e massa* (3º ed.). Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.
- MAC. (2017). *MAC's Pulse Valves*. Retrieved 04 19, 2017, from MAC Valves: <http://www.macvalves.com/valves/small-3-way-valves/pulse-valve>
- Mills, D. (2004). *Pneumatic Conveying Design Guide* (2ª ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Novais, J. (1995). *Ar comprimido Industrial – Produção, Tratamento e distribuição*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- PCM. (2017). *PCM Positive Displacement Pumps*. Retrieved Maio 03, 2017, from <http://www.pcm.eu/en/industry/pcm-solutions>

- Reshine. (2013). *Rubber Cooling Unit*. Retrieved Março 21, 2017, from <http://www.chinakneader.com/en/display.asp?id=14>
- RNAE. (2017). *Associação das Agências de Energia e Ambiente*. Retrieved Março 3, 2017, from RNAE: <http://www.rnae.pt/>
- SGCIE. (2008). Decreto-Lei n.º 71/2008 Diário da República.
- Versa-Matic. (2017). *Versa-Matic E1 1" Pumps*. Retrieved Maio 04, 2017, from <http://www.versamatic.com/products/elimamatic/e1.asp>
- Warrier, P. (2015, Março). *Rubber Mixing Room*. Retrieved Março 2017, 2, from <https://rubbermachineryworld.com/2015/03/06/rubber-mixing-room/>

Anexos

A. Levantamentos Energéticos

No presente anexo são apresentados e explicados os respectivos levantamentos energéticos e de produção obtidos na Continental Mabor para o ano de 2016, com o auxílio do software de monitorização existente na empresa, MESSDAS, e informação fornecida pelo departamento de gestão industrial. Na Tabela A.1 encontram-se representados os valores de produção e consumos energéticos mensais, no decorrer do ano de 2016.

Tabela A.1 Valores de produção e consumos energéticos por mês, no ano de 2016.

Mês	Pneus produzidos	Eletricidade (kWh)	Ar Comprimido (kWh)	Vapor (kg)
Janeiro	1 539 016	7 958 618	786 673	13 466 688
Fevereiro	1 636 133	12 207 705	1 249 258	23 502 503
Março	1 576 376	12 169 368	1 248 493	23 796 139
Abril	1 703 436	11 733 897	1 170 949	20 123 260
Mai	1 767 303	12 891 077	1 269 975	21 057 941
Junho	1 664 051	12 717 642	1 278 139	20 594 124
Julho	1 654 960	12 748 121	1 298 754	19 930 442
Agosto	1 157 101	10 647 085	1 128 483	16 005 078
Setembro	1 637 889	11 648 188	1 186 570	17 174 260
Outubro	1 467 744	12 707 435	1 262 735	19 836 961
Novembro	1 443 082	11 525 135	1 182 302	17 966 880
Dezembro	810 670	10 800 895	1 127 743	24 649 087
Total 2016	18 057 761	139 755 165	14 190 072	238 103 364

Apesar da produção de ar comprimido advir de um consumo elétrico por parte de compressores, no estudo realizado foi separada a energia elétrica resultante dessa produção dos restantes equipamentos existentes na empresa, de forma a comparar em termos de utilidades.

Na Tabela A.2 encontram-se os valores apresentados anteriormente convertidos para Tep (toneladas equivalentes de petróleo).

Tabela A.2 Valores dos consumos energéticos por mês, expressos em toneladas equivalentes de petróleo, no ano de 2016.

Mês	Eletricidade (Tep)	Ar Comprimido (Tep)	Vapor (Tep)	Total Mensal (Tep)
Janeiro	1 711	169	839	2 720
Fevereiro	2 625	269	1 465	4 358
Março	2 616	268	1 483	4 368
Abril	2 523	252	1 254	4 029
Maio	2 772	273	1 312	4 357
Junho	2 734	275	1 284	4 293
Julho	2 741	279	1 242	4 262
Agosto	2 289	243	998	3 529
Setembro	2 504	255	1 070	3 830
Outubro	2 732	271	1 236	4 240
Novembro	2 478	254	1 120	3 852
Dezembro	2 322	242	1 536	4 101
Total 2016	30 047	3 051	14 840	47 938

De forma a ser possível obter os valores presentes na Tabela A.2, foi necessário saber os fatores de conversão para TEP a utilizar para os casos específicos de energia elétrica e vapor. Através da consulta do Diário da República 2ª Série Nº122, despacho Nº17313/2008, foi possível obter esses fatores (DGEG, 2008).

Para o caso da energia elétrica foi realizado o exemplo de cálculo respetivo para o mês de Janeiro.

$$1 \text{ kWh (Eletricidade)} = 215 * 10^{-6} \text{ Tep}$$

$$\text{Eletricidade (Tep)} = \text{Eletricidade (kWh)} * \text{Fator Conversão (kWh} \rightarrow \text{Tep)} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \text{Eletricidade (Tep)} = 7\,958\,618 * 215 * 10^{-6} = 1\,711 \text{ Tep}$$

$$\text{Ar Comp. (Tep)} = \text{Ar Comp. (kWh)} * \text{Fator Conversão (kWh} \rightarrow \text{Tep)} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \text{Consumo Ar Comp. (Tep)} = 786\,673 * 215 * 10^{-6} = 169 \text{ Tep}$$

Relativamente ao vapor, foi necessário saber a variação de entalpia resultante da produção deste, o rendimento da caldeira, e a conversão de energia calorífica para Tep.

Tendo em conta que a água que é alimentada à caldeira se encontra a uma temperatura média de 105 °C, e que o vapor à saída se encontra saturado a uma pressão de 18 barg, então a variação de entalpia correspondente é de 2,3485 GJ/Ton (Incropera & Dewitt, 1992). Sabendo que a caldeira opera com um rendimento aproximado de 90%, e que o fator de conversão de energia térmica para Tep é de 41,868 GJ/Tep, então foi possível converter todos os valores. Nas expressões seguintes encontra-se o exemplo de cálculo relativo ao mês de Janeiro, sendo apenas necessário realizar a mesma sequência de cálculo para os seguintes meses.

$$\Delta H = H_{\text{Vapor Saturado 18 barg}} - H_{\text{Água 105}^\circ\text{C}} = (2798,5 - 450,0) * 10^{-3} = 2,3485 \text{ GJ/Ton}$$

$$\text{Fator Conversão (Ton Vapor} \rightarrow \text{Tep)} = \frac{\Delta H}{\eta(\text{Caldeira}) * \text{Conversão (Tep} \rightarrow \text{Gj)}} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \text{Fator Conversão (Ton Vapor} \rightarrow \text{Tep)} = \frac{2,3485}{0,9 * 41,868} = 0,0623 \frac{\text{Tep}}{\text{Ton Vapor}}$$

$$\text{Vapor (Tep)} = \text{Vapor (Ton)} * \text{Fator Conversão (Ton Vapor} \rightarrow \text{Tep)} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \text{Consumo Vapor (Tep)} = 13\,466\,688 * 10^{-3} * 0,0623 = 839 \text{ Tep}$$

Na Tabela A.3 encontram-se representados os custos associados a cada utilidade para os diversos meses do ano de 2016.

Tabela A.3 Valores dos custos das utilidades por mês, no ano de 2016.

Mês	Eletricidade (€)	Ar Comprimido (€)	Vapor (€)
Janeiro	636 689	62 934	269 334
Fevereiro	976 616	99 941	470 050
Março	973 549	99 879	475 923
Abril	938 712	93 676	402 465
Maio	1 031 286	101 598	421 159
Junho	1 017 411	102 251	411 882
Julho	1 019 850	103 900	398 609
Agosto	851 767	90 279	320 102
Setembro	931 855	94 926	343 485
Outubro	1 016 595	101 019	396 739
Novembro	922 011	94 584	359 338
Dezembro	864 072	90 219	492 982
Total 2016	11 180 413	1 135 206	4 762 067

Relativamente aos custos apresentados das diferentes utilidades, para a realização da sua determinação foi necessário ter em conta o custo unitário da energia elétrica e do vapor utilizado. Através de informações fornecidas pelo departamento de energia da Continental Mabor, o custo médio da energia elétrica corresponde a 0,08 €/kWh e o custo associado ao

vapor é de 20 €/Ton de vapor produzida. Tendo todas as informações disponíveis, foi possível determinar os custos, sendo demonstrado como exemplo de cálculo para o mês de Janeiro.

$$\begin{aligned} \text{Eletricidade (€)} &= \text{Eletricidade (kWh)} * \text{Tarifa Eletricidade} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \text{Eletricidade (€)} = 7\,958\,618 * 0,08 = 636\,689 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ar Comp. (€)} &= \text{Ar Comp. (kWh)} * \text{Tarifa Eletricidade} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \text{Ar Comp. (€)} = 786\,673 * 0,08 = 62\,934 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vapor (€)} &= \text{Vapor (Ton)} * \text{Tarifa Vapor} \left(\frac{\text{€}}{\text{Ton}} \right) \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \text{Vapor (€)} = 13\,466\,688 * 10^{-3} * 20 = 269\,334 \text{ €} \end{aligned}$$

➤ Levantamento Energético dos Misturadores

Realizada a análise dos consumos gerais da empresa, foi efetuado o levantamento dos consumos e produção/processamento de borracha dos diversos misturadores existentes no setor de misturação. Na Tabela A.4 encontram-se representados esses valores, com as respetivas conversões para Tep e os valores resultantes de consumo específico.

Os cálculos realizados nas conversões para Tep seguem a mesma analogia demonstrada anteriormente para o exemplo aplicado à energia elétrica. Relativamente à determinação do consumo específico dos misturadores, será demonstrado o exemplo de cálculo para o misturador 0, sendo apenas necessário realizar o mesmo processo para os restantes.

$$\begin{aligned} \text{Consumo Específico}_{\text{Mist.0}} \left(\frac{\text{Tep}}{\text{Ton Borracha}} \right) &= \frac{\text{Consumo Anual}_{\text{Mist.0}} (\text{Tep})}{\text{Produção Anual (Ton)}} \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \text{Consumo Específico}_{\text{Mist.0}} \left(\frac{\text{Tep}}{\text{Ton Borracha}} \right) = \frac{910}{39806} = 0,023 \frac{\text{Tep}}{\text{Ton}} \end{aligned}$$

Tabela A.4 Valores de produção e consumos energéticos recolhidos para os misturadores, referente ao ano de 2016.

Designação	Produção Anual (Ton)	Consumo Anual (kWh)	Consumo Anual (Tep)	Custo Anual (€)	Consumo Especifico (Tep/Ton)
Misturador 0	39 806	4 233 876	910	338 710 €	0,023
Misturador 1	38 077	2 989 008	643	239 121 €	0,017
Misturador 2	14 107	2 301 083	495	184 087 €	0,035
Misturador 3	35 694	3 021 300	650	241 704 €	0,018
Misturador 4	26 751	4 585 314	986	366 825 €	0,037
Misturador 5	28 369	4 657 707	1 001	372 617 €	0,035
Misturador 6	24 116	5 545 303	1 192	443 624 €	0,049
Misturador 7	25 431	5 365 607	1 154	429 249 €	0,045
Misturador 9	31 147	4 487 617	965	359 009 €	0,031
Misturador 10	32 611	5 356 629	1 152	428 530 €	0,035
Misturador 11	53 137	8 659 066	1 862	692 725 €	0,035
Total	349 247	51 202 511	11 009	4 096 201 €	0,032

➤ **Levantamento Energético da Central de Negro de Fumo**

Realizado o levantamento dos consumos globais dos misturadores, foi necessário avaliar a outra secção em estudo, o sistema de transporte de negro de fumo. O mecanismo é iniciado com a produção de ar comprimido por parte de um conjunto de 5 compressores, tendo sido realizado o levantamento dos consumos energéticos e dos valores de produção de cada um deles. Na Tabela A.5 e Tabela A.6 encontram-se apresentados esses valores.

Tabela A.5 Valores de produção de ar comprimido recolhidos para os compressores da central de negro de fumo, referente ao ano de 2016.

<u>Produção Ar Comprimido (m³ (PTN))</u>					
Mês	Compressor 1	Compressor 2	Compressor 3	Compressor 4	Compressor 5
Janeiro	11 078	18 797	18 827	12 095	203 336
Fevereiro	69 299	5 334	0	42 403	227 392
Março	70 880	32 566	0	42 322	215 478
Abril	52 300	39 634	2 056	17 535	195 181
Maio	195 336	113 872	17 267	23 725	22 811
Junho	165 868	93 795	125 385	13 514	0
Julho	157 215	96 830	97 806	8 762	0
Agosto	145 102	65 546	58 763	8 702	48 342
Setembro	39 244	29 943	22 808	18 641	308 654
Outubro	29 841	26 192	34 516	16 098	320 478
Novembro	18 976	15 183	18 152	10 306	264 924
Dezembro	21 425	6 986	13 419	6 817	227 568
Total 2016	976 565	544 678	416 700	220 920	2 040 024

Tabela A.6 Valores de consumo energético recolhidos para os compressores da central de negro de fumo, referente ao ano de 2016.

<u>Consumo Energético (kWh)</u>					
Mês	Compressor 1	Compressor 2	Compressor 3	Compressor 4	Compressor 5
Janeiro	4 026	6 980	5 462	4 225	32 326
Fevereiro	16 401	2 031	1 008	8 329	35 302
Março	17 333	10 681	0	8 964	34 105
Abril	14 540	14 916	0	5 474	29 692
Maió	31 287	21 786	2 834	7 165	3 045
Junho	30 405	21 123	22 567	5 556	0
Julho	30 044	21 090	19 225	4 828	0
Agosto	26 993	16 552	12 408	4 233	7 101
Setembro	15 616	14 278	5 984	5 536	46 317
Outubro	14 255	15 571	9 332	5 450	47 645
Novembro	11 261	13 666	6 200	4 083	40 395
Dezembro	10 264	6 049	5 329	3 563	35 528
Total 2016	222 427	164 724	90 451	67 406	311 530

Com o registo dos dados apresentados nas tabelas anteriores, foi possível determinar o consumo específico de todos os compressores, numa base anual, encontrando-se estes na Tabela A.7.

Tabela A.7 Valores Anuais para os compressores da central de negro de fumo e respetivo consumo específico, referente ao ano de 2016.

Designação	Produção Ar Comprimido (m ³ (PTN))	Consumo Energético (kWh)	Consumo Especifico (kWh/m ³ (PTN))
Compressor 1	976 565	222 427	0,228
Compressor 2	544 678	164 724	0,302
Compressor 3	416 700	90 451	0,217
Compressor 4	220 920	67 406	0,305
Compressor 5	2 040 024	311 530	0,153
Total Compressores	4 198 887	856 538	0,204

Para o exemplo de cálculo do consumo específico dos compressores, será demonstrado para o conjunto dos compressores.

$$Consumo\ Específico_{Total} \left(\frac{kWh}{m^3 (PTN)} \right) = \frac{Consumo\ Energético_{Total}(kWh)}{Produção\ Ar (m^3 (PTN))} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow Consumo\ Específico_{Total} \left(\frac{kWh}{m^3 (PTN)} \right) = \frac{856538}{4198887} = 0,204 \frac{kWh}{m^3 (PTN)}$$

B. Medidas otimização

B.1 Otimização da central de negro de fumo

- Determinação das fugas existentes na instalação.

Como descrito no subcapítulo 5.1, foi realizada uma avaliação das fugas existentes na central de negro de fumo, tendo para tal sido realizados dois ensaios em período em que não existia consumo de ar comprimido por parte dos utilizadores. Nesse sentido, foram recolhidos dados relativos à variação de pressão nos reservatórios existentes na instalação ao longo de um determinado período de tempo. Na Tabela B.1 e Tabela B.2 encontram-se os dados recolhidos.

Tabela B.1 Dados recolhidos para os dois ensaios realizados na determinação das fugas de ar comprimido da central de negro de fumo.

Tempo (s)	Pressão Ensaio 1 (barg)	Pressão Ensaio 2 (barg)
0	5,82	5,79
30	5,80	5,78
60	5,77	5,85
120	6,49	6,44
150	6,42	6,39
180	6,35	6,35
240	6,26	6,27
270	6,21	6,23
300	6,18	6,16
360	6,11	6,13
390	6,07	6,10
420	6,04	6,07
450	6,01	6,04
480	5,98	6,01
510	5,95	5,99
540	5,93	5,96
570	5,91	5,94
600	5,88	5,92
630	5,85	5,89
690	5,81	5,85
720	5,79	5,83
750	5,76	5,79
780	6,15	5,77

Tabela B.2 Dados recolhidos para os dois ensaios realizados na determinação das fugas de ar comprimido da central de negro de fumo (Continuação).

Tempo (s)	Pressão Ensaio 1 (barg)	Pressão Ensaio 2 (barg)
810	6,46	6,00
840	6,39	6,33
870	6,34	6,47
930	6,24	6,37
960	6,20	6,32
990	6,17	6,28
1020	6,13	6,25
1050	6,10	6,21
1110	6,03	6,15
1170	5,97	6,08
1200	5,95	6,05
1260	5,90	6,00
1290	5,87	5,98
1350	5,83	5,93
1380	5,81	5,91
1410	5,78	5,88
1440	5,76	5,86
1470	6,30	5,84
1500	6,44	5,82
1530	6,38	5,78
1560	6,33	5,84
1590	-	5,90
1620	-	6,49
1650	-	6,37
1680	-	6,31

Através dos dados recolhidos, foi possível determinar o caudal de fugas existentes, usando dois métodos distintos, o primeiro realizando um balanço de massa através do método da capacidade do compressor (balanço global a um ciclo de compressão) (Novais, 1995), e o segundo através do método do volume da instalação em período de vazio (Novais, 1995). Para tal, foi necessário saber a capacidade do compressor principal, que corresponde a 768 m³ (PTN)/h, a massa volúmica do ar às condições normais (PTN), e os tempos de carga e de ciclo obtidos nos ensaios realizados. Na Tabela B.1 pode-se verificar que desde a pressão máxima (6,5 barg) atingida no reservatório até à mínima (5,7 barg) a variação de tempo percorrido entre os dois instantes encontra-se compreendido entre os 630 (750-120 e 1440-

810 segundos) e 660 (780-120 e 1530-870 segundos) segundos, para o ensaio 1 e 2 respetivamente. A partir destes dados, e sabendo que, o tempo em que o compressor passa em carga para voltar a repor a pressão máxima no reservatório foi de 30 segundos, então foi possível determinar as fugas existentes na instalação para ambos os ensaios.

Massa Volúmica do ar às condições PTN (0 °C e 1 atmosfera):

$$\rho_{PTN} = \frac{P * M_M}{R * T} = \frac{(1 * 28,9)}{0,082 * 273} = 1,291 \frac{kg}{m^3(PTN)}$$

Realizando o balanço a um ciclo de compressão, para o método da capacidade do compressor (Novais, 1995), obtém-se os seguintes caudais de fugas para ambos os ensaios:

$$Q_{Compressor\ 5} * \rho_{PTN} * t_{carga\ 1} = Q_{Fugas\ 1} * \rho_{PTN} * t_{ciclo\ 1} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow Q_{Fugas\ 1} = \frac{768 * 30 * 1,291}{1,291 * (660 + 30)} = 33,38 \frac{m^3(PTN)}{h}$$

$$Q_{Compressor\ 5} * \rho_{PTN} * t_{carga\ 2} = Q_{Fugas\ 2} * \rho_{PTN} * t_{ciclo\ 2} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow Q_{Fugas\ 2} = \frac{768 * 30 * 1,291}{1,291 * (630 + 30)} = 34,90 \frac{m^3(PTN)}{h}$$

Obtidos os caudais de fugas para ambos os ensaios realizados, foi determinada a média resultante para este método de determinação:

$$Q_{Fugas} = \frac{33,38 + 34,9}{2} = 34,14 \frac{m^3(PTN)}{h}$$

Realizada a determinação seguindo o método da capacidade do compressor, foi efetuada a determinação para o método do volume da instalação em período de vazio/desligado (Novais, 1995), de forma a obter valores comparativos e validar os resultados obtidos. Nesse sentido, inicialmente foi necessário realizar o levantamento do volume da instalação, encontrando-se as medições e resultados obtidos na Tabela B.3.

Tabela B.3 Características da tubagem e reservatório da central de negro de fumo.

Comprimento Tubagem (m)	25	40
Diâmetro Nominal	DN50	DN80
Diâmetro interior (m)	0,0531	0,0809
Volume Tubagem (m³)	0,0554	0,206
Volume Reservatórios (m³)	10	
Volume Instalação (m³)	10,261	

Para a determinação dos volumes apresentados na tabela anterior, foram realizados os seguintes cálculos:

$$\begin{aligned}
 V_{Tubagem} &= \left(\pi * \frac{D^2}{4} * L \right)_{DN50} + \left(\pi * \frac{D^2}{4} * L \right)_{DN80} \leftrightarrow \\
 \leftrightarrow V_{Tubagem} &= \left(\pi * \frac{0,0531^2}{4} * 25 \right)_{DN50} + \left(\pi * \frac{0,0809^2}{4} * 40 \right)_{DN80} \leftrightarrow \\
 &\leftrightarrow V_{Tubagem} = 0,261 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$V_{Instalação} = V_{Tubagem} + V_{Reservatórios} = 0,261 + 10 = 10,261 \text{ m}^3$$

Obtido o volume da instalação, foi então possível determinar a massa de ar no seu interior para os instantes de pressão máxima e mínima verificada nos ensaios realizados.

$$M_{6,5(bar(g))} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(6,5 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 92,57 \text{ kg}$$

$$M_{5,7(bar(g))} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(5,7 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 82,70 \text{ kg}$$

Com a massa de ar existente na instalação para cada patamar de pressão, foi possível realizar um balanço de massa ao período em que o compressor se encontra em vazio e desligado, ou seja, não existe produção de ar comprimido, apenas consumo por parte das fugas existentes. Neste método, o período de vazio e desligado considerado foi o valor médio obtido entre os dois ensaios realizados, ou seja, 645 segundos. De seguida encontra-se demonstrado o respetivo balanço realizado.

$$\begin{aligned}
 M_{6,5(barg)} &= M_{5,7(barg)} + M_{Fugas} \leftrightarrow \\
 \leftrightarrow Q_{Fugas} * \rho_{PTN} * t_{Vazio e Desligado} &= M_{6,5(barg)} - M_{5,7(barg)} \leftrightarrow \\
 \leftrightarrow Q_{Fugas} &= \frac{92,57 - 82,70}{1,291 * \frac{645}{3600}} = 42,69 \frac{m^3(PTN)}{h}
 \end{aligned}$$

Obtido o caudal de fugas por dois métodos distintos, e tendo sido verificado que estes se encontram na mesma ordem de grandeza, para efeitos de cálculos futuros foi considerado o valor médio obtido entre os dois métodos estudados.

$$Q_{Fugas \text{ médio}} = \frac{34,14 + 42,69}{2} = 38,41 \frac{m^3(PTN)}{h}$$

Com a quantificação do caudal de fugas da instalação, tornou-se possível avaliar o consumo energético associado a este, tendo para tal sido considerado o consumo específico médio da central no ano de 2016, ou seja, 0,204 kWh/m³ (PTN), e uma vez se tratar de fugas, então estas ocorrem 24 horas por dia, 365 dias por ano.

$$Consumo \text{ Anual } Fugas = 38,41 * 0,204 * 24 * 365 = 68648 \frac{kWh}{ano}$$

Uma vez que foram detetadas certas fugas na instalação que podem ser corrigidas, foi realizada a determinação da poupança obtida com a correção destas, e, visto não ser possível quantificar essa poupança, uma redução entre 10 e 50% foi considerada para efeitos de cálculo.

$$Poupança \text{ Redução } 50\% = 68648 * 0,5 * 0,08 = 2746 \text{ €/ano}$$

$$Poupança \text{ Redução } 10\% = 68648 * 0,1 * 0,08 = 549 \text{ €/ano}$$

- Elaboração do plano de controlo a implementar nos compressores

Após a quantificação das fugas existentes na central de negro, e de forma a ir de encontro com os dados obtidos nos levantamentos energéticos, foi elaborado um novo plano de controlo para os compressores, como explicado no subcapítulo 5.1.2. Nesse sentido, todos os valores obtidos encontram-se representados na Tabela B.4.

Tabela B.4 Resumo dos dados obtidos para o novo plano de controlo dos compressores da central de negro de fumo.

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
$Q_{\text{Produzido}} \text{ (m}^3 \text{ (PTN)/h)}$	768	1534	2300	3063
$Q_{\text{Consumido}} \text{ (m}^3 \text{ (PTN)/h)}$	688,4	1338,4	1988,4	2638,4
$P_{\text{Máxima}} \text{ (barg)}$	6,7(6,8)	6,1(6,2)	5,6(5,7)	5,0(5,1)
$M_{P \text{ Máxima}} \text{ (kg)}$	95,04(96,27)	88,20(89,44)	81,39(82,63)	74,59(75,82)
$P_{\text{Mínima}} \text{ (barg)}$	5,8	5,4	5,0	4,6
$M_{P \text{ Mínima}} \text{ (kg)}$	83,93	78,99	74,06	69,12
$t_{\text{Vazio Máximo}} \text{ (s)}$	45,0	45,0	45,0	45,0
$t_{\text{Até Pressão Máxima}} \text{ (s)}$	433,8	149,2	76,8	44,1
$\Delta P \text{ (bar)}$	1,0	0,8	0,7	0,5

De forma a ser possível obter os dados presentes na Tabela B.4, foram necessárias algumas considerações e a realização de alguns cálculos. De seguida serão apresentados esses cálculos e considerações realizadas para cada cenário estudado.

➤ Cenário 1:

No cenário 1 parte-se do pressuposto que apenas irá estar em funcionamento 1 sistema de transporte, com um consumo médio de $650 \text{ m}^3 \text{ (PTN)/h}$, existindo para tal apenas 1 compressor em funcionamento, o que ficará definido como principal. Inicialmente foi então

calculado o caudal de ar comprimido consumido neste cenário, sendo este respetivo a um transporte em funcionamento, e às fugas existentes.

$$Q_{Consumido\ 1} = Q_{Transporte\ Médio} * N^o_{Transportes} + Q_{Fugas\ Médio} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow Q_{Consumido\ 1} = 650 + 38,4 = 688,4\ m^3(PTN)/h$$

Posteriormente foi necessário definir uns dos parâmetros de pressão do compressor, ou o limite superior ou o inferior. Tendo em conta que esta instalação deve possuir uma pressão de ar comprimido superior a 4,5 barg (limite mínimo fixado nos reguladores de pressão à entrada das estações de controlo do transporte pneumático), foi então estabelecido e definido o limite inferior para cada compressor. Visto existirem 4 sistemas de transporte, e de forma a não colocar o limite inferior de pressão muito próximo entre os diferentes compressores necessários, de forma a evitar o acionamento de todos sem que exista essa necessidade, foi definido que o quarto compressor a ligar (cenário 4) tivesse um limite inferior de pressão de 4,6 barg, para que o limite de 4,5 barg nunca fosse atingido. Considerando um intervalo entre limites inferiores dos diferentes compressores de 0,4 bar, foi então obtido o limite inferior do compressor principal de 5,8 barg (correspondente a 4,6 barg mais três vezes o intervalo entre limites inferiores definido de 0,4 bar). Definido esse valor, foi realizado a quantificação da massa de ar existente na instalação a essa pressão, para ser possível realizar o balanço de massa correspondente ao funcionamento deste cenário.

$$M_{5,8\ barg} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(5,8 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 83,93\ kg$$

Realizando o balanço de massa ao sistema em período de vazio, de forma a ser possível obter o limite de pressão superior para o compressor, tendo em conta que este terá um tempo de vazio máximo definido de 45 segundos, tem-se:

$$M_{Pmáxima\ 1} = M_{Pmínima\ 1} + M_{Consumida\ 1} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{Pmáxima\ 1} = M_{5,8\ (bar(g))} + Q_{Consumido\ 1} * \rho_{PTN} * t_{Vazio} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{Pmáxima\ 1} = 83,93 + \left(688,4 * 1,291 * \frac{45}{3600} \right) = 95,04\ kg$$

$$M_{Pmáxima\ 1} = \frac{P * V * M_M}{R * T} \leftrightarrow 95,04 = \frac{(P_{Máxima\ 1} + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow P_{Máxima\ 1} = 6,7\ barg + \Delta P_{Carga/Vazio} = 6,7 + 0,1 = 6,8\ barg$$

$$M_{6,8\ barg} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(6,8 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 96,27\ kg$$

Obtidos os limites de pressão a definir no compressor principal (compressor 5 da Figura 3.20), foi realizado um balanço de massa em período de carga do compressor, de forma a ser possível determinar o tempo que este necessita de trabalhar em carga desde o limite de pressão mínima (5,8 barg) até à pressão máxima (6,8 barg) definida. Nesse sentido, inicialmente foi necessário saber a capacidade de compressão desse compressor, sendo esta de 768 m³ (PTN)/h, através da análise da Tabela 3.1.

$$Q_{Produzido\ 1} = Q_{Compressor\ 5} = 768\ m^3(PTN)/h$$

Tendo todos os dados necessários, foi então realizado o balanço de massa à instalação em período de carga do compressor.

$$\begin{aligned} M_{Pm\acute{a}xima\ 1} + M_{Consumida\ 1} &= M_{Pm\acute{i}nima\ 1} + M_{Produzida\ 1} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow M_{Pm\acute{a}xima\ 1} + Q_{Consumido\ 1} * \rho_{PTN} * t_{Carga} &= M_{Pm\acute{i}nima\ 1} + Q_{Produzido\ 1} * \rho_{PTN} * t_{Carga} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow 96,27 + 688,4 * 1,291 * \frac{t_{Carga}}{3600} &= 83,93 + 768 * 1,291 * \frac{t_{Carga}}{3600} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow t_{Carga} &= 433,8\ segundos \end{aligned}$$

Em suma, o compressor que ficará definido como principal, compressor 5, terá uma pressão de acionamento (funcionamento em carga) de 5,8 barg e como pressão de passagem de funcionamento em carga para vazio de 6,8 barg (6,7 + 0,1 barg, devido à queda de pressão que ocorre na transição de funcionamento em carga para vazio) com um tempo de vazio máximo de 45 segundos, desligando após esse período caso a pressão mínima não seja atingida.

➤ Cenário 2:

No cenário 2, irão estar a ocorrer 2 sistemas de transporte em simultâneo, sendo então necessário quantificar o caudal de ar comprimido consumido nessa situação.

$$\begin{aligned} Q_{Consumido\ 2} &= Q_{Transporte\ M\acute{e}dio} * N^{\circ}_{Transportes} + Q_{Fugas\ m\acute{e}dio} = 650 * 2 + 38,4 \\ &= 1338,4\ m^3(PTN)/h \end{aligned}$$

Obtido esse valor, e tendo sido previamente definido os limites de pressão mínima para os compressores, sendo para este segundo compressor de 5,4 barg (correspondente a 4,6 barg mais duas vezes o intervalo entre limites inferiores definido de 0,4 bar), foi então calculada a massa de ar existente na instalação a essa pressão.

$$M_{5,4 \text{ barg}} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(5,4 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 78,99 \text{ kg}$$

Analogamente ao balanço de massa realizado para o cenário 1, neste cenário foi seguida a mesma lógica, mas tendo em conta que o compressor do cenário 1 já se encontra em funcionamento, sendo então estabelecido o parâmetro de pressão máxima para o segundo compressor a ligar, neste caso, o compressor 1 da Figura 3.20, para o mesmo tempo de vazio máximo de 45 segundos.

$$M_{Pm\acute{a}xima\ 2} + M_{Produzida\ 1} = M_{Pm\acute{m}ima\ 2} + M_{Consumida\ 2} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{Pm\acute{a}xima\ 2} + Q_{Produzida\ 1} * \rho_{PTN} * t_{Vazio} = M_{5,4 (bar(g))} + Q_{Consumido\ 2} * \rho_{PTN} * t_{Vazio} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{Pm\acute{a}xima\ 2} = 78,99 + \left((1338,4 - 768) * 1,291 * \frac{45}{3600} \right) = 88,20 \text{ kg}$$

$$M_{Pm\acute{a}xima\ 2} = \frac{P * V * M_M}{R * T} \leftrightarrow 88,20 = \frac{(P_{M\acute{a}xima\ 2} + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow P_{M\acute{a}xima\ 2} = 6,1 \text{ barg} + \Delta P_{Carga/Vazio} = 6,1 + 0,1 = 6,2 \text{ barg}$$

$$M_{6,2 \text{ barg}} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(6,2 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 89,44 \text{ kg}$$

Obtidos os parâmetros de pressão para o segundo compressor a ligar, foi necessário saber o caudal de ar comprimido produzido neste cenário para ser possível determinar o tempo que este irá passar em período de carga desde o limite de pressão mínima até à pressão máxima. Nesse sentido o caudal de ar produzido será o correspondente ao funcionamento dos dois compressores já especificados, o compressor 5 e 1.

$$Q_{Produzido\ 2} = Q_{Compressor\ 5\ e\ 1} = 768 + 766 = 1534 \text{ m}^3(PTN)/h$$

Realizando o balanço de massa em período de carga do compressor 1 tem-se:

$$M_{Pm\acute{a}xima\ 2} + M_{Consumida\ 2} = M_{Pm\acute{m}ima\ 2} + M_{Produzida\ 2} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{Pm\acute{a}xima\ 2} + Q_{Consumido\ 2} * \rho_{PTN} * t_{Carga\ 2} = M_{Pm\acute{m}ima\ 2} + Q_{Produzido\ 2} * \rho_{PTN} * t_{Carga\ 2} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow 89,44 + 1338,4 * 1,291 * \frac{t_{Carga\ 2}}{3600} = 78,99 + 1534 * 1,291 * \frac{t_{Carga\ 2}}{3600} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow t_{Carga\ 2} = 149,2 \text{ segundos}$$

Em suma, o compressor 1 ficará com os parâmetros de pressão de 5,4 e 6,2 barg, para o limite mínimo e máximo respetivamente, com o tempo de vazio máximo de 45 segundos.

➤ Cenário 3:

No cenário 3, foram seguidos todos os passos explicados anteriormente, mas partindo do princípio que se encontram a ocorrer 3 sistemas de transporte em simultâneo, e que para além de estarem a funcionar os 2 compressores especificados anteriormente, irá entrar em funcionamento um terceiro, o compressor 2 da Figura 3.20.

Nesse sentido, foi então determinado o caudal de ar comprimido consumido neste cenário.

$$Q_{Consumido\ 3} = Q_{Transporte\ Médio} * N^o_{Transportes} + Q_{Fugas\ médio} = 650 * 3 + 38,4 \\ = 1988,4\ m^3(PTN)/h$$

O limite de pressão mínima para o novo compressor que irá entrar em funcionamento será de 5,0 barg (correspondente a 4,6 barg mais uma vez o intervalo entre limites inferiores definido de 0,4 bar), tendo então sido quantificada a quantidade de ar presente na instalação a essa pressão.

$$M_{5,0\ barg} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(5,0 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 74,06\ kg$$

Obtido esse valor, foi realizado o balanço de massa em período de vazio para o novo compressor, partindo do princípio que os dois compressores restantes já se encontram em funcionamento, e para um tempo de vazio máximo de 45 segundos.

$$M_{Pmáxima\ 3} + M_{Produzida\ 2} = M_{Pmínima\ 3} + M_{Consumida\ 3} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{Pmáxima\ 3} + Q_{Produzida\ 2} * \rho_{PTN} * t_{Vazio} = M_{5,0\ (bar(g))} + Q_{Consumido\ 3} * \rho_{PTN} * t_{Vazio} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{Pmáxima\ 3} = 74,06 + \left((1988,4 - 1534) * 1,291 * \frac{45}{3600} \right) = 81,39\ kg$$

$$M_{Pmáxima\ 3} = \frac{P * V * M_M}{R * T} \leftrightarrow 81,39 = \frac{(P_{Máxima\ 3} + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow P_{Máxima\ 2} = 5,6\ barg + \Delta P_{Carga/Vazio} = 5,6 + 0,1 = 5,7\ barg$$

$$M_{5,7\ barg} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(5,7 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 82,63\ kg$$

Relativamente ao caudal de ar comprimido produzido neste cenário em período de carga, este tem em conta os 3 compressores em funcionamento, o compressor 5,1 e 2.

$$Q_{Produzido\ 3} = Q_{Compressor\ 5,1\ e\ 2} = 768 + 766 + 766 = 2300\ m^3(PTN)/h$$

Realizando o balanço de massa em período de carga do compressor 2 tem-se:

$$\begin{aligned} M_{Pmáxima\ 3} + M_{Consumida\ 3} &= M_{Pmínima\ 3} + M_{Produzida\ 3} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow M_{Pmáxima\ 3} + Q_{Consumido\ 3} * \rho_{PTN} * t_{Carga\ 3} &= M_{Pmínima\ 3} + Q_{Produzido\ 3} * \rho_{PTN} * t_{Carga\ 3} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow 82,63 + 1988,4 * 1,291 * \frac{t_{Carga\ 3}}{3600} &= 74,06 + 2300 * 1,291 * \frac{t_{Carga\ 3}}{3600} \leftrightarrow \\ t_{Carga\ 3} &= 76,8\ segundos \end{aligned}$$

Em suma, o compressor 2 ficará com os parâmetros de pressão de 5,0 e 5,7 barg, para o limite mínimo e máximo respetivamente, com o tempo de vazio máximo de 45 segundos.

➤ Cenário 4:

Por fim, no cenário 4 estarão todos os sistemas de transporte em funcionamento (4), ficando 4 compressores em funcionamento, os 3 dos cenários anteriores, e o compressor 4 da Figura 3.20.

Foi então calculado o caudal de ar comprimido consumido neste cenário.

$$\begin{aligned} Q_{Consumido\ 4} &= Q_{Transporte\ Médio} * N^o_{Transportes} + Q_{Fugas\ médio} = 650 * 4 + 38,4 \\ &= 2638,4\ m^3(PTN)/h \end{aligned}$$

Através do parâmetro de pressão mínima já definida para este compressor, de 4,6 barg, foi possível calcular a massa de ar presente na instalação.

$$M_{4,6\ barg} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(4,6 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 69,12\ kg$$

Realizando o balanço de massa em período de vazio do compressor 4, para um tempo de vazio máximo de 45 segundo, tem-se:

$$\begin{aligned} M_{Pmáxima\ 4} + M_{Produzida\ 3} &= M_{Pmínima\ 4} + M_{Consumida\ 4} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow M_{Pmáxima\ 4} + Q_{Produzida\ 3} * \rho_{PTN} * t_{Vazio} &= M_{4,6\ (bar(g))} + Q_{Consumido\ 4} * \rho_{PTN} * t_{Vazio} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow M_{Pmáxima\ 4} &= 69,12 + \left((2638,4 - 2300) * 1,291 * \frac{45}{3600} \right) = 74,59\ kg \end{aligned}$$

$$M_{Pm\acute{a}xima\ 4} = \frac{P * V * M_M}{R * T} \leftrightarrow 74,59 = \frac{(P_{M\acute{a}xima\ 4} + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow P_{M\acute{a}xima\ 2} = 5,0\ barg + \Delta P_{Carga/Vazio} = 5,0 + 0,1 = 5,1\ barg$$

$$M_{5,1\ barg} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(5,1 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 75,82\ kg$$

Obtidos os parâmetros de pressão, foi então realizado o balanço em período de carga para este compressor, tendo em conta que os restantes 3 já se encontram em funcionamento.

$$Q_{Produzido\ 4} = Q_{Compressor\ 5,1,2\ e\ 4} = 768 + 766 + 766 + 763 = 3063\ m^3(PTN)/h$$

$$M_{Pm\acute{a}xima\ 4} + M_{Consumida\ 4} = M_{Pm\acute{in}ima\ 4} + M_{Produzida\ 4} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{Pm\acute{a}xima\ 4} + Q_{Consumido\ 4} * \rho_{PTN} * t_{Carga\ 4} = M_{Pm\acute{in}ima\ 4} + Q_{Produzido\ 4} * \rho_{PTN} * t_{Carga\ 4} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow 75,82 + 2638,4 * 1,291 * \frac{t_{Carga\ 4}}{3600} = 69,12 + 3063 * 1,291 * \frac{t_{Carga\ 4}}{3600} \leftrightarrow$$

$$t_{Carga\ 4} = 44,1\ segundos$$

Em suma, o compressor 4 ficará com os parâmetros de pressão de 4,6 e 5,1 barg, para o limite mínimo e máximo respetivamente, com o tempo de vazio máximo de 45 segundos.

➤ Cenário 3 – Novo Tempo de Vazio:

Obtidos todos os parâmetros para os diferentes compressores, foi testada a sua implementação, e verificou-se que para o cenário 3, mais concretamente para o compressor 2, devido a limitações impostas pelo software do compressor, não foi possível implementar os parâmetros calculados. Nesse sentido, foi mantido o limite de pressão mínima, mas alterando o limite de pressão máximo, tendo no então sido necessário ajustar o tempo de vazio máximo.

Inicialmente foi então determinada a massa de ar existente na instalação para esses dois parâmetros de pressão.

$$M_{5,0\ barg} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(5,0 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 74,06\ kg$$

$$M_{5,9\ barg} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(5,9 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 85,16\ kg$$

Obtidos esses valores, foi realizado novamente o balanço de massa em período de vazio para o compressor 2, com o intuito de determinar o novo tempo de vazio.

$$M_{Pm\acute{a}xima\ 3\ Novo} + M_{Produzida\ 2} = M_{Pm\acute{i}nima\ 3} + M_{Consumida\ 3} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{5,9\ barg} + Q_{Produzida\ 2} * \rho_{PTN} * t_{Vazio\ Novo} = M_{5,0\ barg} + Q_{Consumido\ 3} * \rho_{PTN} * t_{Vazio\ Novo} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow t_{Vazio\ Novo} = \frac{(85,16 - 74,06) * 3600}{((1988,4 - 1534) * 1,291)} = 68,1 \approx 70\ segundos$$

Foi também determinado o novo tempo de carga a que o compressor irá ficar sujeito, para os novos parâmetros definidos.

$$M_{6,0\ barg} = \frac{P * V * M_M}{R * T} = \frac{(6,0 + 1) * 10,261 * 28,9}{0,082 * (273 + 20)} = 86,40\ kg$$

$$M_{Pm\acute{a}xima\ 3\ Novo} + M_{Consumida\ 3} = M_{Pm\acute{i}nima\ 3} + M_{Produzida\ 3} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow M_{6,0\ barg} + Q_{Consumido\ 3} * \rho_{PTN} * t_{Carga\ 3} = M_{Pm\acute{i}nima\ 3} + Q_{Produzido\ 3} * \rho_{PTN} * t_{Carga\ 3} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow 86,40 + 1988,4 * 1,291 * \frac{t_{Carga\ 3\ Novo}}{3600} = 74,06 + 2300 * 1,291 * \frac{t_{Carga\ 3\ Novo}}{3600} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow t_{Carga\ 3\ Novo} = 110,6\ segundos$$

Resumindo, o compressor 2 ficará com os parâmetros de pressão de 5,0 e 6,0 barg, para o limite mínimo e máximo respetivamente, com o tempo de vazio máximo de 70 segundos.

➤ Resultados obtidos com a implementação do plano de controlo.

Tendo sido possível implementar o plano de controlo elaborado, foi realizado o levantamento dos consumos médios registados na central, de forma a determinar o retorno resultante desta medida. Na Tabela B.5 encontram-se representados os dados recolhidos.

Tabela B.5 Dados recolhidos após implementação do plano de controlo elaborado para a central de negro de fumo.

Descrição	Abril	Maio	Junho
Potência média consumida (kW)	67,198	80,355	75,969
Caudal médio produzido (m ³ (PTN)/h)	494,285	600,244	549,926
Consumo específico (kWh/m ³ (PTN))	0,136	0,134	0,138
Consumo específico médio (kWh/m ³ (PTN))	0,136		

Com os dados recolhidos, foi possível calcular o consumo específico mensal da central, sendo realizado o exemplo de cálculo para o mês de Abril.

$$C. Específico \left(\frac{kWh}{m^3 (PTN)} \right) = \frac{Pot. Consumida (kW)}{Q Produzido \left(\frac{m^3 (PTN)}{h} \right)} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow C. Específico = \frac{67,198}{494,285} = 0,136 \frac{kWh}{m^3 (PTN)}$$

Obtido o consumo específico médio da central após implementação do plano de controlo elaborado, foi possível determinar a poupança energética e monetário resultante. O exemplo de cálculo é apresentado de seguida:

$$Poupança Energética = Produção Anual_{Ar Comp.} * (C. Específico_{Antigo} - C. Específico_{Novo})$$

$$Poupança Energética = 4198887 * (0,204 - 0,136) = 285362 kWh$$

$$Poupança Anual = Poupança Energética * Tarifa Eletricidade \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow Poupança Anual = 285362 * 0,08 = 22829 €$$

B.2 Estudo da viabilidade energética/económica na substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas

Nesta secção do Anexo B são apresentados e explicados os dados recolhidos e calculados relativo ao estudo realizado para a substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas dos silos de negro de fumo e dos coletores de aspiração.

➤ Substituição das válvulas nos silos de negro de fumo.

Na Tabela B.6, Tabela B.7 e Tabela B.8 podem ser consultados os dados recolhidos para os ensaios realizados a ambos os tipos de válvulas de 1", tanto em regime de funcionamento, como em momento de paragem, para respetiva quantificação das fugas existentes.

Tabela B.6 Dados experimentais recolhidos relativamente aos consumos de ar comprimido das válvulas do mecanismo de limpeza dos filtros de mangas.

Parâmetros	Ensaio Válvulas Diafragma			Ensaio Válvulas MAC		
Intervalo entre disparos (s)	5	5	5	5	5	5
Duração Ensaio (s)	950	1500	1200	1800	1010	900
Quantidade disparos	190	300	240	360	202	180
Quantidade Ar Inicial (kg)	15,55	3609,73	3654,73	699,26	1211,01	1679,42
Quantidade Ar Final (kg)	38,63	3647,20	3684,66	737,15	1232,65	1698,6
Quantidade Ar Consumida (kg)	23,08	37,47	29,93	37,89	21,64	19,18
Quantidade Ar Consumida (m ³ (PTN))	17,88	29,02	23,18	29,35	16,76	14,86

Tabela B.7 Dados experimentais recolhidos relativamente aos consumos de ar comprimido das válvulas do mecanismo de limpeza dos filtros de mangas (Continuação).

Parâmetros	Ensaio Válvulas Diafragma			Ensaio Válvulas MAC		
Quantidade Ar/Disparo (m ³ (PTN))	0,0941	0,0967	0,0966	0,0815	0,0830	0,0825
Caudal Ar (m ³ (PTN)/h)	67,75	69,66	69,55	58,70	59,75	59,43
Quantidade Médio Ar/Disparo (m ³ (PTN))	0,0958			0,0823		
Caudal Médio Ar (m ³ (PTN)/h)	68,99			59,29		

Com os dados recolhidos nos ensaios realizados, foi possível determinar o volume de ar comprimido utilizado por disparo de limpeza, como também o caudal horário em regime de funcionamento. Como exemplo de cálculo será realizada a demonstração para o ensaio 1 das válvulas de diafragma, sendo apenas necessário realizar o mesmo procedimento para os restantes ensaios.

$$\frac{V_{Ar}}{Disparo} = \frac{M_{Final} - M_{Inicial}}{\rho_{PTN} * N^{\circ} Disparos} = \frac{38,63 - 15,55}{1,291 * 190} = 0,0941 \text{ m}^3$$

$$Q_{Ar} = \frac{M_{Final} - M_{Inicial}}{\rho_{PTN} * t_{Ensaio}} = \frac{38,63 - 15,55}{1,291 * \frac{950}{3600}} = 67,75 \text{ m}^3/h$$

Para os ensaios realizados na determinação das fugas (Tabela B.8), os cálculos realizados partem do mesmo princípio demonstrado anteriormente, tendo sido realizada a determinação do caudal horário de fugas.

Tabela B.8 Dados experimentais recolhidos relativamente às fugas de ar comprimido das válvulas do mecanismo de limpeza dos filtros de mangas.

Parâmetros	Ensaio Válvulas Diafragma			Ensaio Válvulas MAC		
Quantidade Ar Inicial (kg)	3064,99	3361,20	3487,96	1267,66	1678,46	1678,90
Quantidade Ar Final (kg)	3065,60	3361,73	3488,60	1267,80	1678,61	1679,04
Tempo de Ensaio (s)	300	300	300	300	300	300
Caudal Ar (kg/h)	7,32	6,36	7,68	1,68	1,8	1,68
Caudal Ar (m ³ (PTN)/h)	5,67	4,93	5,95	1,30	1,39	1,30
Caudal Fugas Médio (m ³ (PTN)/h)	5,52			1,33		

Obtidos todos os dados relativos ao regime de funcionamento das diferentes válvulas, foi possível quantificar os gastos associados a esse funcionamento, tendo sido realizada a extrapolação dos dados recolhidos para outros intervalos de tempo entre disparos de limpeza. Na Tabela B.9 encontram-se representados os resultados obtidos.

Tabela B.9 Resultados intermédios obtidos para as estimativas realizadas relativamente ao funcionamento das válvulas MAC 1" a instalar nos silos de negro de fumo.

Descrição	Válvulas Diafragma	Válvulas MAC				
Tempo entre Disparos (s)	5	5	10	15	30	60
Caudal Ar Comprimido (m ³ (PTN)/h)	68,99	59,29	29,65	19,76	9,88	4,94
Consumo Energético (kWh)	7,59	6,52	3,26	2,17	1,09	0,54
Custo (€/h de funcionamento)	0,607	0,522	0,261	0,174	0,087	0,043
Redução Custos (%)	-	14,1	57,0	71,4	85,7	92,8

Inicialmente foi então necessário determinar os novos caudais de ar comprimido consumido para os regimes de funcionamento considerados (intervalos de tempo entre disparos de 10,15,30 e 60 segundos), tendo para tal sido realizados os cálculos seguintes, usando como exemplo o intervalo entre disparos de 15 segundos.

$$Q_{Ar\ Comp\ (MAC\ X\ seg.)} = \frac{Q_{Ar\ Comprimido\ (MAC\ 5\ seg.)}}{\frac{t_{MAC\ X\ seg.}}{t_{MAC\ 5\ seg.}}}$$

$$Q_{Ar\ Comp\ (MAC\ 15\ seg.)} = \frac{Q_{Ar\ Comprimido\ (MAC\ 5\ seg.)}}{\frac{t_{MAC\ 15\ seg.}}{t_{MAC\ 5\ seg.}}} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow Q_{Ar\ Comp\ (MAC\ 15\ seg.)} = \frac{59,29}{\frac{15}{5}} = 19,76\ m^3\ (PTN)/h$$

Obtido o caudal de ar comprimido consumido por hora de funcionamento, foi então possível determinar o consumo energético associado a este, tendo em conta que o consumo específico do ar comprimido de 6 barg da fábrica é de 0,11 kWh/m³ (PTN), e que o custo médio do kWh de energia elétrica corresponde a 8 cêntimos.

$$\begin{aligned} \text{Consumo Energético}_{MAC\ 15\ seg.} &= Q_{Ar\ Comp\ (MAC\ 15\ seg.)} * C.Específico \leftrightarrow \\ \leftrightarrow \text{Consumo Energético}_{MAC\ 15\ seg.} &= 19,76 * 0,11 = 2,17\ kWh \\ \text{Custo}_{MAC\ 15\ seg.} &= \text{Consumo Energético}_{MAC\ 15\ seg.} * \text{Tarifa Eletricidade} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow \text{Custo}_{MAC\ 15\ seg.} &= 2,17 * 0,08 = 0,174 \frac{\text{€}}{h} \end{aligned}$$

Obtidos esses resultados, foi determinada a redução dos custos/caudal de ar associado ao aumento do intervalo entre disparos de limpeza com a implementação das novas válvulas MAC.

$$\begin{aligned} \text{Redução Custos} &= \frac{\text{Custo}_{Diafragma\ 5\ seg.} - \text{Custo}_{MAC\ 15\ seg.}}{\text{Custo}_{Diafragma\ 5\ seg.}} \leftrightarrow \\ \text{Redução Custos} &= \left(\frac{0,607 - 0,174}{0,607} \right) * 100 = 71,4\% \end{aligned}$$

Obtidos os custos por hora de funcionamento, para cada intervalo de tempo entre disparos considerado, e tendo em conta que as válvulas dos silos de negro de fumo se encontram em funcionamento 24 horas por dia no total (12 horas por cada linha de transporte, ou seja, hora e meia em cada silo (17 silos)), foi possível determinar os possíveis períodos de retorno do investimento para os diferentes intervalos. O investimento total para a substituição das válvulas necessárias aos 17 silos que se encontram em funcionamento é 38 250€ (85 válvulas, 450€ cada). Na Tabela B.10 encontram-se representados os resultados obtidos para o estudo realizado.

Tabela B.10 Resultados obtidos para a substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas nos silos diários de negro de fumo.

Descrição	Válvulas Diafragma	Válvulas MAC				
Tempo entre Disparos (s)	5	5	10	15	30	60
Custo (€/h de funcionamento)	0,607	0,522	0,261	0,174	0,087	0,043
Poupança Anual Regime Funcionamento (€/ano)	-	716,62	2 908,02	3 638,49	4 368,96	4 734,20
Poupança Anual Fugas (€/ano)	-	5 159,16				
Poupança Total (€/ano)	-	5 875,78	8 067,19	8 797,66	9 528,12	9 893,36
Período de Retorno do Investimento (Anos)	-	6,51	4,74	4,35	4,01	3,87

De forma a ser possível entender os cálculos realizados para a obtenção dos resultados apresentados na Tabela B.10, será apresentado como exemplo os cálculos efetuados para a situação em que o intervalo de tempo entre disparos atingido com as novas válvulas é de 15 segundos, sendo que para os restantes tempos foi realizada a mesma analogia, alterando apenas os custos por hora de funcionamento obtidos para cada intervalo de tempo definido.

Inicialmente foi determinada a poupança obtida com a redução das fugas existentes, tendo sido considerado que estas ocorrem no decorrer de todo o dia, 365 dias por ano, e que apenas os silos que não se encontram em regime de funcionamento, ou seja, a realizar disparos de limpeza, apresentam fugas. Nesse sentido, foi considerado o tempo por dia que

estes não se encontram em funcionamento. Tendo em conta que o conjunto de todos os silos funciona apenas 24 horas, então isto equivale a apenas um dos silos se encontrar em funcionamento contínuo no decorrer do dia, ou seja, os restantes 16 apresentam apenas o consumo em fugas nesse período. Posto isto foi possível realizar o seguinte cálculo:

$$Poupan\c{c}a\ Anual_{Fugas}$$

$$= (Q_{Fugas\ Diafragma} - Q_{Fugas\ MAC}) * t_{Fugas} * C.Especifico \\ * Tarifa\ Eletricidade * \left(N^o_{Silos\ Total} - \frac{N^o_{Silos\ Funcionamento}}{dia} \right) \leftrightarrow$$

$$Poupan\c{c}a\ Anual_{Fugas} = (5,52 - 1,33) * 24 * 365 * 0,11 * 0,08 * \left(17 - \frac{24}{24} \right) = 5159,16\ \text{€/ano}$$

Obtido a poupança resultante da diminuição das fugas existentes, foi determinada a poupança obtida com a alteração do regime de funcionamento, ou seja, com a alteração do intervalo de tempo entre disparos de limpeza. Nesse sentido, foi realizado a seguinte determinação, tendo em conta o período de laboração da empresa de 350 dias.

$$Poupan\c{c}a\ Anual_{Regime\ 15\ seg.} = (Custo_{Diafragma} - Custo_{MAC\ 15\ seg.}) * t_{Funcionamento} \leftrightarrow$$

$$Poupan\c{c}a\ Anual_{Regime\ 15\ seg.} = (0,607 - 0,174) * 24 * 350 = 3638,49\ \text{€/ano}$$

$$Poupan\c{c}a\ Total_{Regime\ 15\ seg.} = Poupan\c{c}a\ Anual_{Regime\ 15\ seg.} + Poupan\c{c}a\ Anual_{Fugas} \leftrightarrow$$

$$Poupan\c{c}a\ Total_{Regime\ 15\ seg.} = 3638,49 + 5159,16 = 8797,66\ \text{€/ano}$$

Obtida a poupança total resultante deste regime de funcionamento das novas válvulas MAC 1", foi possível determinar o período de retorno do investimento associado.

$$Periodo\ de\ retorno_{Regime\ 15\ seg.} = \left(\frac{Investimento\ Total}{Poupan\c{c}a\ Total_{Regime\ 15\ seg.}} \right)_{Válvulas\ MAC\ 1"} \leftrightarrow$$

$$Periodo\ de\ retorno_{Regime\ 15\ seg.} = \left(\frac{38250}{8797,66} \right)_{Válvulas\ MAC\ 1"} = 4,35\ Anos$$

- Substituição das válvulas nos coletores de aspiração dos misturadores.

Realizado o estudo relativo à substituição das válvulas nos silos diários de negro de fumo, foi analisada a mesma possibilidade mas para o caso específico dos coletores de aspiração presentes nos misturadores, coletores estes que realizam a aspiração da porta de entrada de matérias-primas na câmara de mistura. Estes coletores funcionam juntamente com os misturadores, e uma vez que estes operam 24 sobre 24 horas, então o mesmo ocorre com os coletores. Nestes existem os mesmos mecanismos de filtros de mangas existentes nos silos diários, sendo realizada a sua limpeza da mesma maneira, através de disparos de ar comprimido distanciados por um intervalo de tempo. Porém, nos coletores as válvulas que realizam essa limpeza são de dimensões superiores, 1"1/2, e como tal a quantidade de ar comprimido debitado por disparo de limpeza é superior ao obtido nos ensaios experimentais realizados nos silos de negro de fumo. Nesse sentido, foi necessário saber a relação entre a quantidade de ar comprimido debitado entre ambas as válvulas, para uma pressão de alimentação do ar comprimido de 6 barg. Posto isto, e através de dados recolhidos junto do fornecedor das válvulas MAC, foi possível obter essa relação. Na Tabela B.11 podem ser consultadas essas relações.

Tabela B.11 Dados recolhidos relativos à relação existente entre a quantidade de ar comprimido consumido por disparo de limpeza das válvulas de 1", em relação a válvulas de outras dimensões.

Diâmetro Nominal	Diâmetro (mm)	Razão
1 1/2"	38,1	2,25
2"	50,8	4,00
2 1/2"	63,5	6,25
3"	76,2	9,00

Analisando a Tabela B.11, verifica-se que a razão entre a quantidade de ar comprimido debitado por uma válvula de 1"1/2 relativamente à de 1" é de 2,25, o que indica que a quantidade de ar comprimido consumido por disparo de limpeza é 2,25 vezes superior. Aplicando esta relação aos resultados obtidos, tem-se uma quantidade de ar usado por disparo de limpeza das válvulas de diafragma de 215,58 dm³ (PTN), e de 185,29 dm³ (PTN) para as válvulas MAC, mantendo assim a mesma percentagem de redução obtida para o estudo realizado nas válvulas aplicadas nos silos diários de negro de fumo.

Obtidos estes valores, foi possível determinar o caudal horário de funcionamento para ambas as válvulas, tendo em consideração que as válvulas presentes nos coletores atualmente possuem um intervalo médio de tempo entre disparos de 4 segundos.

$$Q_{Ar\ Comp\ (Diafragma\ 4\ seg.)} = V_{Ar\ Comprimido\ (Diafragma)} * \frac{N^o\ Disparos}{Hora} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow Q_{Ar\ Comp\ (Diafragma\ 4\ seg.)} = 215,58 * \frac{3600}{4} * 10^{-3} = 194,02\ m^3\ (PTN)/h$$

$$Q_{Ar\ Comp\ (MAC\ 4\ seg.)} = V_{Ar\ Comprimido\ (MAC)} * \frac{N^o\ Disparos}{Hora} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow Q_{Ar\ Comp\ (MAC\ 4\ seg.)} = 185,29 * \frac{3600}{4} * 10^{-3} = 166,76\ m^3\ (PTN)/h$$

Obtidos estes valores, foi possível realizar a mesma análise apresentada para os silos de negro de fumo, tendo sido considerados os mesmos intervalos de tempo entre disparos de limpeza. Na Tabela B.12 encontram-se representados os resultados intermédios obtidos, tendo sido realizada a mesma analogia de cálculo apresentada para as válvulas dos silos de negro de fumo da Tabela B.9.

Tabela B.12 Resultados intermédios obtidos para as estimativas realizadas relativamente ao funcionamento das válvulas MAC 1"1/2 a instalar nos coletores de aspiração dos misturadores.

Descrição	Válvulas Diafragma	Válvulas MAC				
		4	10	15	30	60
Tempo entre Disparos (s)	4	4	10	15	30	60
Caudal Ar Comprimido (m ³ (PTN)/h)	194,02	166,76	66,70	44,47	22,23	11,12
Consumo Energético (kWh)	21,34	18,34	7,34	4,89	2,44	1,22
Custo (€/h de funcionamento)	1,707	1,470	0,587	0,391	0,196	0,098
Redução Custos (%)	-	14,1	65,6	77,1	88,5	94,3

Obtidos os dados intermédios, foi possível determinar os períodos de retorno de investimento para a substituição das válvulas necessárias a todos os coletores, ou seja, um total de 162 válvulas a 550 € cada, perfazendo um total de 89100€ (9 coletores de aspiração). Para essa determinação foi tido em conta que cada coletor funciona na totalidade das 24 horas existentes num dia, 350 dias de laboração por ano. Na Tabela B.13 encontram-se representados os resultados finais.

Tabela B.13 Resultados obtidos para a substituição das válvulas de limpeza dos filtros de mangas nos coletores de aspiração dos misturadores.

Descrição	Válvulas Diafragma	Válvulas MAC				
Tempo entre Disparos (s)	4	4	10	15	30	60
Custo (€/h de funcionamento)	1,707	1,470	0,587	0,391	0,196	0,098
Poupança Anual / Coletor (€/ano)	-	2 015,49	9 411,49	11 055,04	12 698,60	13 520,37
Poupança Total (9 Coletores) (€/ano)	-	18 139,38	84 703,37	99 495,37	114 287,36	121 683,36
Período de Retorno do Investimento (Anos)	-	4,91	1,05	0,90	0,78	0,73

Como exemplo de cálculo serão apresentados os passos realizados para o cenário em que o intervalo de tempo entre disparos possível obter será de 15 segundos. Inicialmente é realizado o cálculo para a poupança obtida num coletor de aspiração, sendo posteriormente determinada a poupança total média dos 9 coletores existentes.

$$Poupança\ Anual/Coletor_{Regime\ 15\ seg.} = (Custo_{Diafragma} - Custo_{MAC\ 15\ seg.}) * t_{Funcionamento}$$

$$Poupança\ Anual/Coletor_{Regime\ 15\ seg.} = (1,707 - 0,391) * 24 * 350 = 11055,04\ €/ano$$

$$Poupan\c{a} \text{ Total}_{Regime \ 15 \ seg.} = Poupan\c{a} \text{ Anual}/Coletor_{Regime \ 15 \ seg.} * N^o \ Coletores$$

$$Poupan\c{a} \text{ Total}_{Regime \ 15 \ seg.} = 11055,04 * 9 = 99495,37 \text{ €/ano}$$

Obtida a poupança total resultante deste regime de funcionamento das novas válvulas MAC 1"1/2, foi possível determinar o período de retorno do investimento associado.

$$Perodo \ de \ retorno_{Regime \ 15 \ seg.} = \left(\frac{Investimento \ Total}{Poupan\c{a} \ Total_{Regime \ 15 \ seg.}} \right)_{Válvulas \ MAC \ 1"1/2} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow Perodo \ de \ retorno_{Regime \ 15 \ seg.} = \left(\frac{89100}{99495,37} \right)_{Válvulas \ MAC \ 1"1/2} = 0,90 \text{ Anos}$$

B.3 Substituição das bombas de recirculação dos tanques de banho antiaderentes dos misturadores

No presente subanexo encontram-se os dados relativos à medida de otimização proposta para a substituição das bombas dos tanques de banho, sendo apresentadas as informações recolhidas, como também os cálculos realizados.

Inicialmente foram realizadas medições relativamente ao consumo de ar comprimido das bombas de diafragma existentes nos diferentes misturadores e strainer, com o auxílio de um caudalímetro termomássico da marca Endress+Hauser, tendo sido recolhidos os dados presentes na Tabela B.14.

Tabela B.14 Dados experimentais recolhidos relativamente aos consumos de ar comprimido das bombas de diafragma duplo utilizadas nos tanques de banho dos misturadores.

Equipamento	Caudal médio (m ³ (PTN)/h)
Misturador 11	11,62
Misturador 10	17,01
Misturador 9	21,52
Misturador 7	30,67
Misturador 6	38,11
Misturador 5	Sem Medição
Misturador 4	19,06
Misturador 3	Sem Medição
Misturador 2	Sem Medição
Misturador 1	34,86
Misturador 0	17,49
Strainer	44,02
Valor Médio	26,04

Com a recolha destes dados, e tendo sido obtido um valor de consumo médio, foi possível através da curva característica da bomba de diafragma (Figura B.1) estimar o caudal médio debitado por estas, de forma a facilitar o processo de dimensionamento das novas bombas. O caudal de fluido obtido encontra-se compreendido entre os 1,8 e os 4 m³/h, dependendo da pressão de descarga das mesmas.

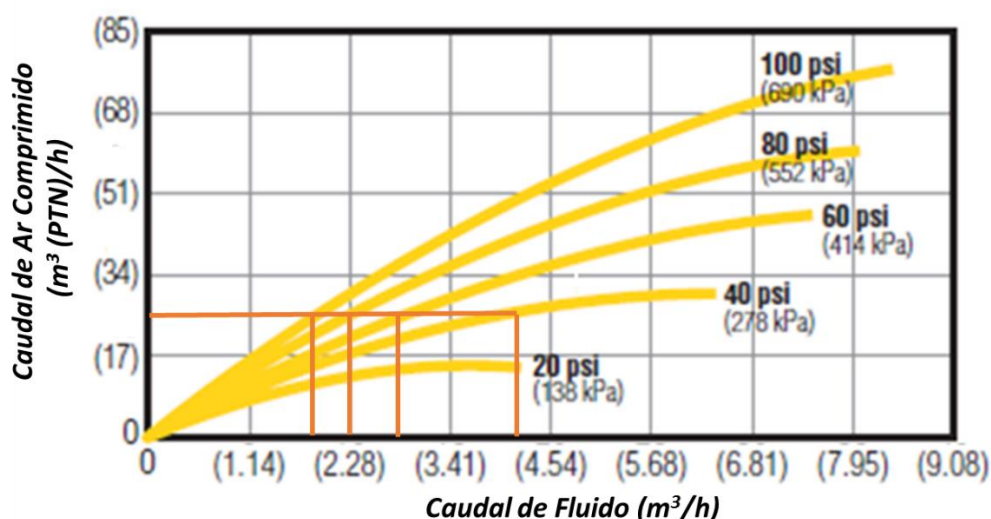


Figura B.1 Curva característica da bomba de diafragma utilizada nos tanques de banho (Adaptado de (Versa-Matic, 2017)).

Através de todos os dados recolhidos, foi possível pedir cotação (Tabela B.15) e as especificações técnicas (Figura B.2) para uma bomba que se enquadra-se nos requisitos necessários, tendo sido calculada a poupança obtida com a substituição da bomba, e o período de retorno obtido.

Tabela B.15 Cotações obtidas para a aquisição da bomba PCM 2M6F com e sem variador de frequência.

Descrição	Caudal Máximo (m³/h)	Preço Unitário (€)
Bomba PCM 2M6F c/ VFD	2,36	1542
Bomba PCM 2M6F s/ VFD	2,36	992

PCM EcoMoineau; M1 progressing cavity pump type 2M6F [340-2360l/h (0 bar) - 1770l/h (4 bar)]. Horizontal mounting.

DATASHEET 5

CONDITIONS DE SERVICE / OPERATING CONDITIONS

Flow-rate characteristics variable
Speed variation type integrated VFD / external VFD
Flow-rate range 340-2360l/h (0 bar) - 1770l/h (4 bar)

DONNEES POMPE / PUMP DATA

Model 2M6F
Pump body material cast iron
Type of connections tapped connections
Discharge connection dimensions 3/4"BSP
Suction connection dimensions 1"BSP
Rotor material hard chromed AISI 420 stainless steel
Rubber coupling material NBR
Stator material NBR
Temperature range 0-60°C
Sealing assembly single
Mating face material carbide/carbide
Sealing o-ring material FKM
Painting process 1 - atmosphere with low level of pollution
Painting colour blue RAL 5019
Tests standard
Test certificate? no

DONNEES ENTRAÎNEMENT / DRIVE DATA

Motor speed in rpm 250/1600
Number of poles 6
Power in kW 0,55
Motor supply 3-Ph. 400V (+/-10%) at 50Hz or 480V (+/-10%) at 60Hz
Drive options with speed control knob

Figura B.2 Especificações técnicas fornecidas pelo fornecedor da bomba PCM 2M6F dimensionada.

Para o caso das bombas de diafragma existentes, o cálculo dos custos associados ao consumo de ar comprimido por bomba encontram-se representados de seguida, tendo em conta que a taxa de ocupação destas é de 100%, funcionando 24h por dia, no decorrer do período de laboração da empresa de 350 dias, e que consomem o ar comprimido proveniente da rede de 6 barg da fábrica, que possui um consumo específico de 0,11 kWh/ m³ (PTN).

$$\text{Consumo Energético}_{B.Diafragma} = Q_{Ar\ Comp.} * C.Específico * N^{\circ}Horas\ Funcionamento \leftrightarrow$$

$$\text{Consumo Energético}_{B.Diafragma} = 26,04 * 0,11 * 24 * 350 = 24061\ kWh/ano$$

$$\text{Custo Anual}_{B.Diafragma} = \text{Consumo Energético}_{B.Diafragma} * \text{Tarifa Eletricidade} \leftrightarrow$$

$$\text{Custo Anual}_{B.Diafragma} = 24061 * 0,08 = 1924,9\ €/ano$$

No caso das novas bombas elétricas PCM, foram realizados os cálculos do consumo estimado das mesmas, tendo em conta a potência nominal consumida por estas, sendo posteriormente realizado o cálculo da poupança obtida com a implementação e o período de retorno do investimento para ambas as cotações obtidas.

$$\text{Consumo Energético}_{B.PCM} = Pot_{B.PCM} * N^{\circ}Horas\ Funcionamento \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \text{Consumo Energético}_{B.PCM} = 0,55 * 24 * 350 = 4620 \frac{kWh}{ano}$$

$$\text{Custo Anual}_{B.PCM} = \text{Consumo Energético}_{B.PCM} * \text{Tarifa Eletricidade} \leftrightarrow$$

$$\text{Custo Anual}_{B.PCM} = 4620 * 0,08 = 369,6 \frac{€}{ano}$$

$$\text{Poupança Anual} = 1924,9 - 369,6 = 1555,3 \frac{€}{ano}$$

$$\text{Redução Consumo Energético} = \left(\frac{24061 - 4620}{24061} \right) * 100 = 80,8\%$$

O período de retorno do investimento obtido para a bomba com variador de frequência integrado foi de:

$$\text{Periodo de retorno} = \left(\frac{\text{Investimento}}{\text{Poupança Anual}} \right)_{\text{Por Bomba c/VFD}} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \text{Periodo de retorno} = \left(\frac{1542,0}{1555,3} \right)_{\text{Por Bomba c/VFD}} = 0,991\ Anos = 11,90\ Meses$$

Para a bomba sem variador de frequência o valor obtido foi de:

$$\text{Periodo de retorno} = \left(\frac{\text{Investimento}}{\text{Poupança Anual}} \right)_{\text{Por Bomba s/VFD}} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \text{Periodo de retorno} = \left(\frac{992,0}{1555,3} \right)_{\text{Por Bomba s/VFD}} = 0,638 \text{ Anos} = 7,65 \text{ Meses}$$

Obtidos os resultados principais inerentes a esta medida, foi também realizada uma estimativa da poupança obtida em termos de manutenção, no que diz respeito a cada tipo de bomba. Na Tabela B.16 e Tabela B.17 encontram-se representados esses custos associados, para a bomba de diafragma e PCM respetivamente.

Tabela B.16 Custos associados à manutenção das bombas de diafragma.

Descrição	Kits Reparação Consumidos /5 Meses	Preço/kit (€)	Custo Manutenção (€/ano)	Custo Manutenção (€/bomba)
Kit Membranas/Diafragma	14	148	4 972,8	414,4
Kit pneumático	16	143	5 491,2	457,6
Total	30	-	10 464	872

Em termos de cálculos realizados para a determinação do custo de manutenção anual por bomba, estes encontram-se representados de seguida.

$$\text{Custo Manutenção} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = \frac{\text{Kits Reparação}}{5 \text{ Meses}} * \frac{\text{Preço}}{\text{Kit}} * \frac{12 \text{ Meses}}{5 \text{ Meses}} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \text{Custo Manutenção} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = 14 * 148 * \frac{12}{5} = 4972,8 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

$$Custo\ Manutenção \left(\frac{€}{bomba} \right) = \frac{Custo\ Manutenção\ Total \left(\frac{€}{ano} \right)}{N^o\ Bombas} \leftrightarrow$$

$$Custo\ Manutenção \left(\frac{€}{bomba} \right) = \frac{10464}{12} = 872 \frac{€}{bomba}$$

Tabela B.17 Custos estimados relativamente à manutenção das bombas PCM 2M6F.

Descrição	Kits Reparação Estimados/Ano (bomba)	Preço/kit (€)	Custo Manutenção (€/ano (bomba))
Estator NBR	1	91	91
Empanque mecânico simples (Carbureto/Carbureto- FKM)	1	140	140
Kit de O´Rings	1	61	61
Rotor HardChrome	1	195	195
Total	4	-	487